

C O L U M N A S L I Q U I D A S
E N I N G R A V I D E Z

I N F O R M E F I N A L 1982

Lamf-ETSIA, Laboratorio de Aerodinámica
E.T.S.I.Aeronáuticos, Ciudad Universitaria,
MADRID-3

EXPEDIENTE CONIE: 643/82

Madrid, Diciembre 1982

Ref: Lamf 8212

EXPEDIENTE nº 643/82

COLUMNAS LIQUIDAS EN CONDICIONES DE INGRAVIDEZ - 1982

Convenio de Investigación entre la Comisión Nacional de Investigación del Espacio (CONIE) y la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), desarrollado por el Laboratorio de Aerodinámica (LAMF) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos (ETSIA) durante el año 1982.

Responsable del trabajo... I. Da-Riva de la Cavada

Colaboradores I. Martínez Herranz

J. Meseguer Ruiz

A. Sanz Andrés

D. Rivas Rivas

MEMORIA

A un año vista del primer vuelo del Spacelab el panorama actual del Experimento 1-ES-331, tras más de siete años de desarrollo, está en gran medida dominado por la presión de los últimos preparativos técnicos.

La integración de este experimento con los otros seis que comparten el uso del Módulo de Física de Fluidos (FPM) en esta primera misión, y la de todos ellos con el resto de los equipos del Banco de Proceso de Materiales en el que será ubicado el FPM, supone un considerable esfuerzo de coordinación: acoplamiento de equipos, distribución de recursos comunes, criterios de prioridad, desarrollo del logical para la adquisición de datos y control de secuencia y, sobre todo, formación de los operadores de vuelo, todo lo cual proporciona una carga de trabajo adicional al esfuerzo teórico-experimental que se va realizando en paralelo.

Un claro ejemplo de lo antedicho nos lo muestra la confección del guión (también llamado "Procedimientos") que deberá seguir el astronauta para la ejecución de los ensayos. La primera versión, una especie de declaración de intenciones, acompañaba la Propuesta de Investigación remitida a la Agencia Espacial Europea en 1976. Los primeros Procedimientos propiamente dichos se prepararon en 1978, una vez desarrollado el FPM; posteriormente se han venido revisando anualmente hasta Febrero de este año, en que se desplazaron a Madrid un astronauta y un experto en confección de procedimientos para uniformizar criterios y "ultimar detalles".

Apenas dos meses después, en la reunión de experimentadores y operadores de vuelo celebrada en Londres, se vio la necesidad de rehacer otra vez los Procedimientos para tener en cuenta los rea

justes ocasionados por una nueva redistribución de recursos que, en nuestro caso, fue muy favorable al aumentarnos la cantidad disponible de película fotográfica.

En Julio tuvo lugar en Colonia otra semana de entrenamiento con el FPM, durante la cual se descubrieron nuevos condicionantes que motivaron una nueva revisión de los Procedimientos. Esta nueva versión, como ya se apuntaba en el Informe Parcial de Septiembre, volvió a ser modificada a la luz de las valiosas enseñanzas obtenidas durante las dos semanas de simulación de vuelo en Octubre, esta vez con todos los equipos integrados, usándose por primera vez los enlaces de radio y TV para la interacción de los investigadores con los astronautas durante la realización de los experimentos. También se vio en este ensayo general la importancia de la transmisión de datos a Tierra en tiempo real, y del gran esfuerzo que va a suponer la interpretación de estos datos "en directo", por lo que se piensa trabajar más en este sentido.

En otro orden de cosas, con respecto a los estudios teórico-experimentales que sirven de soporte a este experimento, se debe destacar la gran acogida y el interés que tienen estos trabajos, de lo cual dan testimonio las publicaciones que en este año han sido admitidas en diversas revistas de carácter internacional, con un artículo de tipo teórico-numérico, otro experimental y un tercero sobre simulación en ordenador:

- "On the Breaking of Slender, Axisymmetric Liquid Bridges",
por J. Meseguer, admitido en J. Fluid Mech.
- "Minimum Volume for a Liquid Bridge between Equal Discs",
por A. Sanz e I. Martínez, admitido en J. Colloid
Interface Sci.

- "Computer Simulation of the Utilization of the Fluid Physics Module for Spacelab 1", por I. Martínez, en ESA Journal.

Por otra parte, hay que resaltar la colaboración prestada por este Laboratorio en la preparación del pabellón español para la exposición UNISPACE 82, organizada por las Naciones Unidas y celebrada el pasado mes de Agosto en Viena, donde presentamos varios posters y una nueva producción en vídeo sobre este proyecto de investigación.

Con motivo de nuestra participación en este proyecto internacional, la Agencia Espacial Europea, en colaboración con esta Universidad, va a organizar el 4º Symposium Europeo de Ciencia de los Materiales en Microgravedad, en Madrid, del 5 al 8 de Abril próximo, donde tenemos previsto presentar varios artículos sobre diferentes aspectos de este proyecto.

I N D I C E

VOLUMEN 1

	Página
1. ANALISIS ENERGETICO DE LA HIDRODINAMICA DE LA ZONA FLOTANTE	1
1.1. INTRODUCCION	2
1.2. TERMODINAMICA DE LAS INTERFASES	2
1.2.1. Modelo de Gibbs de las interfases	2
1.2.2. Equilibrio de una interfase	6
1.3. ZONA CILINDRICA ANCLADA	10
1.4. EVOLUCION ENERGETICA EN LA ROTURA DE UNA ZONA CILINDRICA	14
2. INFLUENCIA DEL BAÑO DE PLATEAU EN LA DINAMICA DE PUENTES LIQUIDOS ANCLADOS A DISCOS IGUALES	22
2.1. INTRODUCCION	23
2.1.1. Problemas afines	24
2.2 ECUACIONES GENERALES DEL MOVIMIENTO Estrictamente AXILSIMETRICO DE LA ZONA FLOTANTE EN BAÑO DE PLATEAU	26
2.3. ANALISIS LINEAL DEL PROBLEMA TRIDIMENSIONAL NO VISCOSO	31
2.3.1. Influencia del baño	49
3. PUENTES LIQUIDOS ENTRE APOYOS NO CONVENCIONALES	58
3.1. INTRODUCCION	59
3.2. PLANTEAMIENTO MATEMATICO	63
3.2.1. Equilibrio	63
3.2.2. Estabilidad	66

3.3. ZONAS ANCLADAS A DISCOS DESIGUALES	68
3.3.1. Límite de estabilidad	75
3.3.2. Efecto de una pequeña diferencia de diámetros en la bifurcación	82
3.3.3. Desprendimiento y desbordamiento	85
3.3.4. Tratamiento por ordenador	90

VOLUMEN 2

4. ANALISIS NO LINEAL DE LA DINAMICA DE ROTURA DE UNA ZONA FLOTANTE	102
4.1. INTRODUCCION	103
4.2. MODELO UNIDIMENSIONAL	104
4.3. ESTUDIO DE LA BIFURCACION PARA ZONAS CILINDRICAS.	106
4.3.1. Dinámica de la rotura	109
4.3.2. Solución estacionaria	111
4.3.3. Solución de semejanza	111
4.3.4. Resultados	114
4.4. ESTUDIO DE LA BIFURCACION PARA ZONAS CILINDRICAS EN ROTACION	117
4.4.1. Modelo unidimensional para zonas en rotación	117
4.4.2. Análisis de la rotura	120
4.4.3. Solución estacionaria	121
4.4.4. Solución de semejanza	121
4.4.5. Resultados	123
4.5. CONCLUSIONES	123
5. SIMULACION EN ORDENADOR DEL MODULO DE FISICA DE FLUIDOS UTILIZADO EN LA REALIZACION DEL EXPERIMENTO 1-ES-331 EN EL SPACELAB	126
5.1. INTRODUCCION	127
5.2. UTILIZACION DEL FPM	128
5.3. SIMULACION DEL OPERADOR	129

5.4. SIMULACION DEL FPM	135
5.5. SIMULACION DE LA RECEPCION DE DATOS EN TIERRA	140

. APENDICE: FLOATING ZONE STABILITY IN ZERO GRAVITY (Status
Report)

4. ANALISIS NO LINEAL DE LA DINAMICA DE ROTURA DE UNA ZONA
FLOTANTE

4. ANALISIS NO LINEAL DE LA DINAMICA DE ROTURA DE UNA ZONA FLOTANTE

4.1. INTRODUCCION

En el estudio de la dinámica de las zonas flotantes, un problema de especial importancia es la rotura de las mismas, ya que tanto en las utilizaciones industriales como en los experimentos que se lleven a cabo en el espacio con zonas flotantes, en particular los próximos a realizar a bordo del Spacelab, en el Módulo de Física de Fluidos (FPM), este efecto podría ser catastrófico por la pérdida de tiempo que acarrea.

Con objeto de poder abordar el problema, es necesario introducir una serie de simplificaciones e hipótesis que permitan obtener un modelo cuyo tratamiento matemático sea posible. En particular, en este caso el estudio se reduce a zonas cilíndricas esbeltas que, por otro lado, son las que mayor importancia tienen desde el punto de vista de su utilización industrial, suponiéndolas sometidas únicamente a perturbaciones mecánicas estrictamente axilsimétricas y despreciando el efecto de la viscosidad.

En estas condiciones, el problema se simplifica notablemente ya que es posible describirlo mediante un modelo unidimensional del cual, aparte de un análisis lineal, se conoce un análisis numérico no lineal cuyos resultados definen el plano esbeltez-deformación inicial prácticamente en su totalidad [1].

En estos análisis numéricos no es posible sin embargo el estudio del entorno del punto de bifurcación ya que el tiempo de cálculo sería muy grande. En el trabajo que se realiza a continuación se va a estudiar la dinámica de rotura en las proximidades de dicho punto de bifurcación mediante un análisis no lineal basado en la técnica de perturbaciones singulares. Posteriormente

se realiza un estudio análogo para el caso en que la zona está en rotación uniforme.

4.2. MODELO UNIDIMENSIONAL

Sea una zona líquida cilíndrica comprendida entre dos discos sólidos de igual diámetro, coaxiales y paralelos entre sí, y rodeada de un gas con densidad mucho menor que la del líquido. Se pretende analizar la evolución con el tiempo de dicha zona cuando es sometida a una perturbación estrictamente axilsimétrica de un modo que, en el instante inicial, la forma de la zona (entrefase líquido-gas) difiere levemente de la forma cilíndrica, Fig. 1.

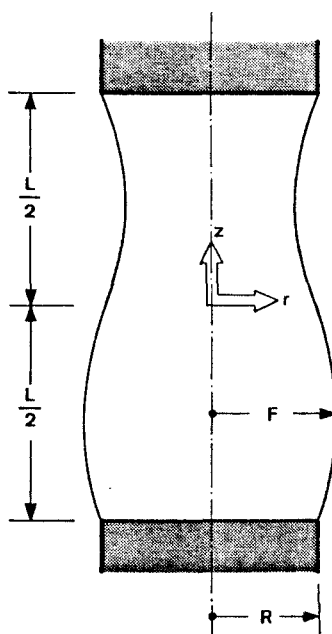


Fig. 1. Geometría y sistema de coordenadas para una zona flotante axilsimétrica deformada ($S=F^2$).

Las ecuaciones y condiciones de contorno que definen el problema fueron desarrolladas en [1] así como las hipótesis introducidas con objeto de obtener una formulación matemática sencilla. Si, además, se desprecian los efectos viscosos y se supone que la zona es esbelta, $\Lambda \gg 1$ ($\Lambda=L/2R$ es la esbeltez de la zona), está justificada la utilización del modelo unidimensional en el que la velocidad radial, v , es mucho menor que la velocidad axial, w , y ésta y la presión reducida, P , son independientes de la coordenada radial, r , quedando en consecuencia la ecuación de cantidad de movimiento radial desacoplada del resto de la formulación, aunque la velocidad radial interviene en la ecuación de continuidad. Con objeto de eliminar u se pueden sustituir las ecuaciones de continuidad y de contorno en la entrefase (que indica que ésta es superficie fluida) por otra que exprese la conservación de la masa de un modo global en cada sección, que puede obtenerse bien aplicando el teorema de continuidad a una rodaja de la zona, o mediante integración radial de la ecuación de continuidad, teniendo en cuenta la condición anterior de contorno en la entrefase.

Si se utilizan como nuevas variables $S(z,t)=F^2$, que representa, salvo el factor π , el área de la zona en cada sección, y $Q(z,t)=wF^2$, que es proporcional a la cantidad de movimiento axial en cada sección, las ecuaciones del movimiento, en variables adimensionales, quedan en la forma [1]:

$$\text{Continuidad:} \quad \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\text{Cantidad de movimiento:} \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{Q^2}{S} \right) = - S \frac{\partial P}{\partial z} \quad (2)$$

siendo (ecuación de equilibrio según la normal en la entrefase)

$$P = \frac{2}{\left[4S + \left(\frac{\partial S}{\partial z}\right)^2\right]^{1/2}} \left[1 - \frac{2S \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} - \left(\frac{\partial S}{\partial z}\right)^2}{4S + \left(\frac{\partial S}{\partial z}\right)^2} \right] \quad (3)$$

con las condiciones de contorno

$$Q(\pm\Lambda, t) = 0 \quad (4)$$

$$S(\pm\Lambda, t) = 1 \quad (5)$$

la condición de volumen correspondiente a la zona cilíndrica

$$\int_{-\Lambda}^{\Lambda} S dz = 2\Lambda \quad (6)$$

y las condiciones iniciales

$$S(z, 0) = S_0(z) \quad (7)$$

$$Q(z, 0) = Q_0(z) \quad (8)$$

donde $S_0(z)$ debe cumplir (6)

4.3. ESTUDIO DE LA BIFURCACION PARA ZONAS CILINDRICAS

Se va a analizar el comportamiento dinámico de las columnas líquidas en el entorno de $\Lambda=\pi$. Para ello se hace el cambio

$$\Lambda = \pi(1+m\lambda\epsilon) \quad (9)$$

donde ϵ (positivo y pequeño) es el orden de magnitud de la separación respecto al punto de bifurcación, que se va a usar para el desarrollo asintótico; m es el signo ($m=\pm 1$) que indica si se tra-

ta de un cilindro linealmente estable ($\Lambda < \pi$) o inestable ($\Lambda > \pi$), y λ (positivo) es el parámetro de orden unidad que fija el valor de Λ .

Vamos a ver primero que la bifurcación es del tipo cúspide simétrica inestable, por lo que el desarrollo de la configuración perturbada ha de hacerse en potencias de $\sqrt{\epsilon}$ y no de ϵ [2].

La forma perturbada (Fig. 1) puede ponerse, en primera aproximación, como

$$S_0 = 1 + a \sin \frac{\pi}{\Lambda} z \quad -\Lambda \leq z \leq \Lambda \quad (10)$$

donde a es un parámetro pequeño relacionado con λ y que tratamos de demostrar que es de orden $\sqrt{\epsilon}$. Para que (10) sea de equilibrio, la ecuación (2) indica que $dP/dz = 0$. Sustituyendo (10) en (3) se obtiene el desarrollo

$$P = 1 + \frac{a}{2} \left(\frac{\pi^2}{\Lambda^2} - 1 \right) \sin \frac{\pi}{\Lambda} z + \frac{a^2}{8} \left[\frac{\pi^2}{\Lambda^2} - 3 \left(\frac{\pi^2}{\Lambda^2} - 1 \right) \sin^2 \frac{\pi}{\Lambda} z \right] - \frac{a^3}{32} \frac{\pi^2}{\Lambda^2} \left(7 \frac{\pi^2}{\Lambda^2} - 1 \right) \sin \frac{\pi}{\Lambda} z + O(a^4) \quad (11)$$

donde se aprecia que, efectivamente, la bifurcación ocurre para $\Lambda = \pi$. Para que P no dependa de z , los términos en a y a^3 deben ser opuestos (el término en a^2 es constante o de orden superior), de donde se deduce

$$a^2 = \frac{16 \left(\frac{\pi^2}{\Lambda^2} - 1 \right)}{\frac{\pi^2}{\Lambda^2} \left(7 \frac{\pi^2}{\Lambda^2} - 1 \right)} = - \frac{16}{3} m \lambda \epsilon \quad (12)$$

que muestra que las ramas existen para $m=-1$ ($\Lambda < \pi$) y forman en primera aproximación una parábola, como se quería demostrar, es decir, a es de orden $\sqrt{\epsilon}$.

Si la S_0 no es de equilibrio, aparecerá una $\partial P / \partial z$ de orden a^3 (es decir, $\epsilon^{3/2}$) según (11), lo que obligará a iniciarse un movimiento con arreglo a (1) y (2). Llamando n_1 y n_2 a los órdenes de magnitud del tiempo y la velocidad, para que se cumplan (1) y (2) con variaciones de S de orden $\sqrt{\epsilon}$, se verificará

$$\begin{aligned} \sqrt{\epsilon} \epsilon^{-n_1} &= \epsilon^{n_2} & n_1 &= -\frac{1}{2} \\ \epsilon^{n_2} \epsilon^{-n_1} &= \epsilon^{3/2} & n_2 &= 1 \end{aligned} \quad (13)$$

es decir, una deformación de orden $\epsilon^{1/2}$ da lugar a variaciones axiales de presión de orden $\epsilon^{3/2}$ que originan velocidades axiales de orden ϵ en tiempos de orden $\epsilon^{-1/2}$.

El desarrollo será, pues

$$S = 1 + \epsilon^{1/2} s_1 + \epsilon s_2 + \epsilon^{3/2} s_3 + O(\epsilon^2) \quad (14)$$

$$Q = \epsilon q_2 + \epsilon^{3/2} q_3 + O(\epsilon^2) \quad (15)$$

y la nueva variable tiempo (de orden unidad) será

$$\tau = t\sqrt{\epsilon} \quad (16)$$

Además, para normalizar las condiciones de contorno, se hace el cambio de variable

$$z = x(1 + m\lambda\epsilon) \quad (17)$$

4.3.1. Dinámica de la Rotura

Introduciendo las expresiones (9) y (14) a (17) en las ecuaciones y condiciones de contorno (1) a (6) y sustituyendo (3) en (2), se obtiene el siguiente desarrollo:

- Continuidad

$$\text{orden } \epsilon \quad s_{1\tau} + q_{2x} = 0 \quad (18)$$

- Cantidad de movimiento

$$\text{orden } \epsilon^{1/2} \quad 0 = s_{1xxx} + s_{1x} \quad (19)$$

$$\text{orden } \epsilon \quad 0 = s_{2xxx} + s_{2x} = s_1 s_{1xxx} - s_{1x} s_{1xx} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \text{orden } \epsilon^{3/2} \quad q_{2\tau} = & \frac{1}{2} (s_{3xxx} + s_{3x}) - m\lambda s_{1xxx} + \\ & + \frac{1}{2} s_{1x}^3 + \frac{1}{8} s_{1x}^2 s_{1xxx} - \frac{3}{8} s_{1x} s_{1xx}^2 - \\ & - (s_{1x} s_{2x})_x + s_1 s_{2xxx} + s_{1xxx} s_2 \quad (21) \end{aligned}$$

- Condiciones de contorno

$$\text{orden } \epsilon^{1/2} \quad s_1(\pm\pi, \tau) = 0 ; \int_{-\pi}^{\pi} s_1 dx = 0 \quad (22)$$

$$\text{orden } \epsilon \quad s_2(\pm\pi, \tau) = 0 ; \int_{-\pi}^{\pi} s_2 dx = 0 ; q_2(\pm\pi, \tau) = 0 \quad (23)$$

$$\text{orden } \epsilon^{3/2} \quad s_3(\pm\pi, \tau) = 0 ; \int_{-\pi}^{\pi} s_3 dx = 0 ; q_3(\pm\pi, \tau) = 0 \quad (24)$$

- Condiciones iniciales

$$\text{orden } \epsilon^{1/2} \quad s_1(x, 0) = A_0 \sin x \quad (25)$$

$$\text{orden } \epsilon \quad s_2(x, 0) = 0 ; q_2(x, 0) = 0 \quad (26)$$

Las soluciones van siendo las siguientes:

- Orden $\varepsilon^{1/2}$. De (19) y (22) se obtiene

$$s_1 = A_1(\tau)\text{sen}x \quad (27)$$

- Orden ε . De (20) y (23), con el resultado anterior, se tiene

$$s_2 = A_2(\tau)\text{sen}x \quad (28)$$

y de (18), (27) y (23) se deduce

$$q_2 = A_1\tau(1+\cos x) \quad (29)$$

- Orden $\varepsilon^{3/2}$. La integración de (21), con los resultados anteriores, proporciona

$$\begin{aligned} s_3 = & (-A_1\tau\tau + m\lambda A_1 + \frac{3}{16} A_1^3)x \cdot \cos x + 2A_1\tau\tau x + \\ & + \frac{1}{64} A_1^3 \text{sen}3x + A_3(\tau)\text{sen}x \end{aligned} \quad (30)$$

y al imponer (24) se llega a la condición

$$A_1\tau\tau - \frac{m\lambda}{3} A_1 - \frac{1}{16} A_1^3 = 0 \quad (31)$$

que va a determinar la evolución de la amplitud de la deformación, que a partir de ahora llamaremos simplemente $A(\tau)$ y que ha de verificar, en resumen

$$A_{\tau\tau} - \frac{m\lambda}{3} A - \frac{1}{16} A^3 = 0 \quad (32)$$

$$A(0) = A_0 \quad (33)$$

$$A_{\tau}(0) = 0 \quad (34)$$

4.3.2. Solución Estacionaria

Se trata aquí de comprobar la relación (12) a la vista del resultado general (32).

Efectivamente, de (32) se deduce que, en el caso estacionario

$$-\frac{m\lambda}{3} A - \frac{1}{16} A^3 = 0 \quad (35)$$

luego

$$A^2 = -\frac{16}{3} m\lambda \quad (36)$$

que, teniendo en cuenta las escalas usadas, coincide con (12).

4.3.3. Solución de Semejanza

Volviendo al problema dinámico resumido en (32) a (34), puede eliminarse el parámetro λ redefiniendo las variables A y τ . Efectivamente, ensayando

$$A = \alpha f(\lambda) \quad (37)$$

$$\tau = \theta g(\lambda) \quad (38)$$

la ecuación (32) toma la forma

$$\alpha_{\theta\theta} \frac{f}{g^2} - \frac{m\lambda}{3} \alpha f - \frac{1}{16} \alpha^3 f^3 = 0 \quad (39)$$

con lo que, eligiendo

$$f = 4 \sqrt{\frac{\lambda}{3}} \quad ; \quad g = \sqrt{\frac{3}{\lambda}} \quad (40)$$

queda reducida a

$$\alpha_{\theta\theta} - m\alpha - \alpha^3 = 0 \quad (50)$$

con

$$\alpha(0) = \alpha_0 \equiv \frac{A_0}{4} \sqrt{\frac{3}{\lambda}} \quad (51)$$

$$\alpha_{\theta}(0) = 0 \quad (52)$$

Como en la ecuación diferencial (50) no aparece explícitamente la variable independiente, puede reducirse de orden tomando como nueva variable independiente α y como función $\dot{\alpha} \equiv \alpha_{\theta}$, es decir, pasando al plano de las fases. De (50) se obtiene

$$\frac{d\dot{\alpha}}{d\alpha} = \frac{m\alpha + \alpha^3}{\dot{\alpha}} \quad (53)$$

y las condiciones iniciales (51) y (52) proporcionan

$$\dot{\alpha}(\alpha_0) = 0 \quad (54)$$

La interpretación en el plano de las fases (Fig. 2) es la siguiente:

Caso $m=1$ ($\Lambda > \pi$)

De (53) se deduce que las únicas soluciones estacionarias son las de $\alpha=0$, con un único punto singular en el origen, $\alpha=\dot{\alpha}=0$, en cuyo entorno las trayectorias son hipérbolas equiláteras dadas por

$$\dot{\alpha}^2 - \alpha^2 = \text{cte.} \quad (55)$$

que indican claramente una divergencia hacia la rotura.

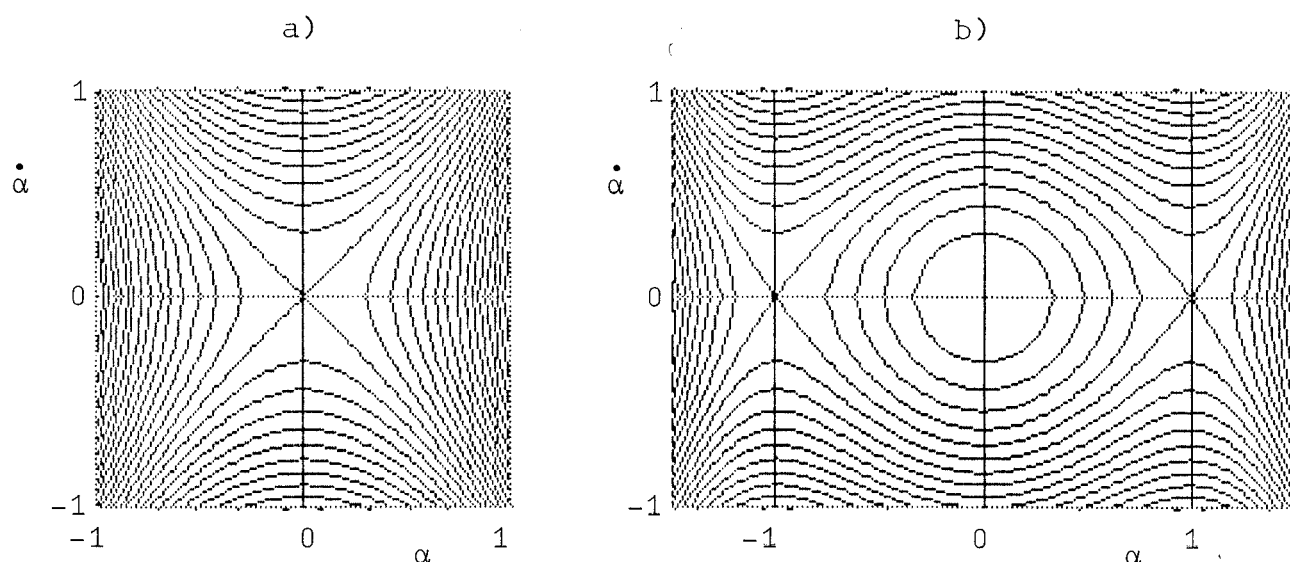


Fig. 2. Plano de las fases deformación-velocidad de deformación (ecuación (53)).
a) Caso $m=1$ ($\Lambda > \pi$), b) Caso $m=-1$ ($\Lambda < \pi$). Las líneas llenas de $\alpha = \text{cte.}$ son los estados estacionarios.

Caso $m=-1$ ($\Lambda < \pi$)

De (53) se deduce que hay tres posibles soluciones estacionarias, la $\alpha=0$ y las $\alpha=\pm 1$, con puntos singulares en $\alpha=\dot{\alpha}=0$, en cuyo entorno las trayectorias son ahora circulares

$$\dot{\alpha}^2 + \alpha^2 = \text{cte.} \quad (56)$$

y en $\alpha=\pm 1$, $\dot{\alpha}=0$, en cuyo entorno las trayectorias siguen siendo hipérbolas equiláteras.

Aunque en un principio se eligieron las condiciones iniciales (7) y (8), en la Fig. 2 puede apreciarse claramente el efecto de cualquier otra combinación de deformación inicial y velocidad inicial (en la forma (29)).

4.3.4. Resultados

Se trata de determinar los tiempos de rotura (o de oscilación) en función de las condiciones iniciales. Para ello se integra (53), obteniéndose la ecuación siguiente para la evolución de la amplitud de la deformación:

$$\theta = \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{d\alpha}{\sqrt{(\alpha^2 - \alpha_0^2) \left(m + \frac{\alpha^2 + \alpha_0^2}{2}\right)}} \quad (57)$$

la cual puede ponerse en función de la integral elíptica de primera especie

$$F(\phi, \psi) = \int_0^{\phi} \frac{d\phi}{\sqrt{1 - \sin^2 \psi \sin^2 \phi}} \quad (58)$$

como se resumen en la Tabla 1 para los diferentes casos particulares que aparecen.

Los tiempos de rotura se obtienen simplemente haciendo tender la amplitud a infinito ($\alpha \rightarrow \infty$), es decir, que la amplitud de la perturbación salga del rango $\sqrt{\epsilon}$ y pase a ser de orden unidad.

Similarmente, los períodos de oscilación se obtienen multiplicando por 4 el tiempo que tarda en pasar por $\alpha=0$ la primera vez, en el caso de oscilación. Deshaciendo los cambios (37), (38) y (14), (16), se obtiene para los períodos de oscilación la expresión

$$T = \sqrt{\frac{512}{\frac{32}{3} \frac{\pi - \Lambda}{\pi} - a_0^2}} F \left[\pi/2, \arcsen \sqrt{\frac{a_0^2}{\frac{32}{3} \frac{\pi - \Lambda}{\pi} - a_0^2}} \right] \quad (59)$$

Tabla 1

Evolución de la amplitud, α , con el tiempo θ en función de la deformación inicial, α_0 .

$m = 1$	(Rotura)	$\theta = \frac{1}{\sqrt{\alpha_0^2 + 1}} F \left[\arccos \frac{\alpha_0}{\alpha}, \arcsen \sqrt{\frac{\alpha_0^2 / 2 + 1}{\alpha_0^2 + 1}} \right]$
	$2 \leq \alpha_0^2$ (Rotura)	$\theta = \frac{1}{\sqrt{\alpha_0^2 - 1}} F \left[\arccos \frac{\alpha_0}{\alpha}, \arcsen \sqrt{\frac{\alpha_0^2 / 2 - 1}{\alpha_0^2 - 1}} \right]$
$m = -1$	$1 \leq \alpha_0^2 \leq 2$ (Rotura)	$\theta = \frac{\sqrt{2}}{\alpha_0} \left[F \left[\pi/2, \arcsen \sqrt{\frac{2 - \alpha_0^2}{\alpha_0^2}} \right] - F \left[\arcsen \frac{\alpha_0}{\alpha}, \arcsen \sqrt{\frac{2 - \alpha_0^2}{\alpha_0^2}} \right] \right]$
	$0 \leq \alpha_0^2 \leq 1$ (Oscilación)	$\theta = \frac{2}{\sqrt{2 - \alpha_0^2}} \left[F \left[\pi/2, \arcsen \sqrt{\frac{\alpha_0^2}{2 - \alpha_0^2}} \right] - F \left[\arcsen \frac{\alpha}{\alpha_0}, \arcsen \sqrt{\frac{\alpha_0^2}{2 - \alpha_0^2}} \right] \right]$

donde a_0 (ecuación (10)), T y Λ son las variables físicas, adimensionalizadas, pero no dilatadas.

De igual manera se puede proceder con el resto de las expresiones de la Tabla 1 para los tiempos de rotura.

Para comparar estos resultados con los de la simulación numérica realizada por Meseguer [1], se han representado en la

Fig. 3 las líneas de tiempo de rotura (o período de oscilación) constante para los mismos valores de [1] y con la misma variable para medir la amplitud de la deformación, esto es, representando en ordenadas

$$\frac{R-R_{\min}}{R} = 1 - \sqrt{1 - a} \quad (60)$$

El acuerdo con los datos del cálculo numérico es muy bueno en el entorno $\Lambda = \pi$ (para donde se ha hecho el análisis). Como comprobación adicional, se puede comparar la pulsación, $\omega = 2\pi/T$, con el movimiento oscilatorio para $a_0 = 0$, dado por (59),

$$\omega = \sqrt{\frac{\pi - \Lambda}{3\pi}} \quad (61)$$

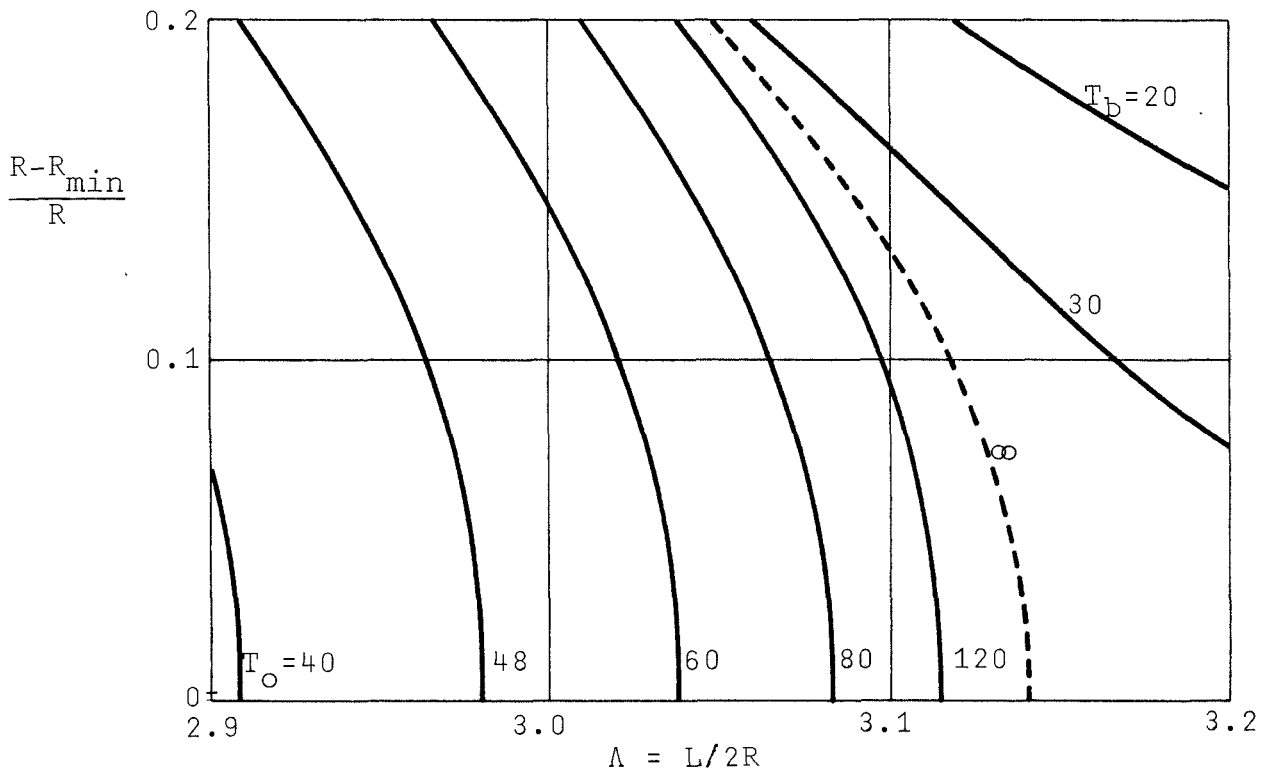


Fig. 3. Diagrama deformación-esbeltez para zonas cilíndricas de radio R y longitud L , mostrando tiempos de rotura, T_b , y períodos de oscilación, T_o .

con el resultado del análisis lineal de [1], obteniéndose un error relativo que crece al separarnos de $\Lambda = \pi$ en la proporción aproximada

$$\frac{\omega - \omega_1}{\omega_1} = - \frac{\pi - \Lambda}{2} \quad (62)$$

4.4. ESTUDIO DE LA BIFURCACION PARA ZONAS CILINDRICAS EN ROTACION

Se va a analizar en este apartado la bifurcación para una zona cilíndrica larga **en rotación** uniforme. En primer lugar se va a obtener el modelo matemático que va a permitir dicho análisis, modelo que al igual que cuando no hay rotación será unidimensional, estudiándose después el problema de la rotura.

4.4.1. Modelo Unidimensional para Zonas en Rotación

Si la zona está en rotación y se la somete a una perturbación estrictamente axilsimétrica, debido a las fuerzas de Coriolis aparecen velocidades según la coordenada azimutal, siendo no obstante las variables del movimiento independientes de esta coordenada (el problema es axilsimétrico). Las ecuaciones adimensionales del movimiento en ejes giratorios en este caso, despreciando los efectos viscosos, son las siguientes [1]:

$$\text{Continuidad:} \quad \frac{\partial F^2}{\partial t} + \frac{\partial (w F^2)}{\partial z} = 0 \quad (63)$$

$$\text{Cantidad de movimiento:} \quad \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{v^2}{r} = \Omega^2 r + 2\Omega v - \frac{\partial P}{\partial r} \quad (64)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{uv}{r} = - 2\Omega u \quad (65)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{\partial P}{\partial z} \quad (66)$$

Condiciones iniciales y de contorno: como en (4) a (8).

En el entorno del punto de bifurcación, la velocidad de rotación crítica es muy pequeña (en $\Lambda=\pi$ es cero) y, al igual que la amplitud de la deformación, el orden de magnitud que se considera es

$$\Omega \sim \sqrt{\varepsilon} \quad (67)$$

siendo los órdenes de magnitud del tiempo y de la velocidad axial iguales que sin rotación:

$$t \sim \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (68)$$

$$w \sim \varepsilon \quad (69)$$

Se va a suponer también aquí que la zona es esbelta de forma que se admite el carácter unidimensional del movimiento en el sentido de considerar la velocidad axial mucho mayor que las velocidades en el plano transversal. Dado que en el caso sin rotación la velocidad radial desaparecía de la formulación, no se fijó en ningún momento su orden de magnitud, pero al ser la velocidad axial de orden ε , las velocidades en el plano transversal serán al menos de orden $\varepsilon^{3/2}$; se admite pues

$$u \sim \varepsilon^{3/2} \quad (70)$$

$$v \sim \varepsilon^{3/2} \quad (71)$$

La ecuación de cantidad de movimiento radial se puede poner en virtud de las expresiones anteriores en la forma siguiente:

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \Omega^2 r + o(\varepsilon^2) \quad (72)$$

y, puesto que en la resolución del problema mediante el método de perturbaciones singulares se llega hasta el orden $\varepsilon^{3/2}$ puede admitirse

$$P = \frac{1}{2} \Omega^2 r^2 + p(z, t) \quad (73)$$

La ecuación de cantidad de movimiento azimutal no interviene en el problema al ser todos sus términos como mínimo de orden ε^2 . Y en cuanto a la ecuación de cantidad de movimiento axial, puede ponerse

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial t} + o(\varepsilon^2) \quad (74)$$

por lo que puede admitirse al igual que en el caso sin rotación que la velocidad axial es independiente de la coordenada radial; aunque esta ecuación podría ponerse en la forma

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial t} \quad (75)$$

con objeto de utilizar las ecuaciones obtenidas en el apartado 3 se conserva el término convectivo aun sabiendo que no interviene

en el problema, es decir, se tiene

$$\frac{\partial w}{\partial t} + w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (76)$$

Y si ahora se consideran las variables $S=F^2$ y $Q=wF^2$, las ecuaciones anteriores quedan en la forma

$$\text{Continuidad:} \quad \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial z} = 0 \quad (77)$$

$$\text{Cantidad de movimiento:} \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{Q^2}{S} \right) = - S \frac{\partial p}{\partial z} \quad (78)$$

siendo (ecuación de equilibrio según la normal en la entrefase)

$$p = \frac{2}{\left[4S + \left(\frac{\partial S}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2}} \left[1 - \frac{2S \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} - \left(\frac{\partial S}{\partial z} \right)^2}{4S + \left(\frac{\partial S}{\partial z} \right)^2} \right] - \frac{1}{2} \Omega^2 S \quad (79)$$

con las condiciones (4) a (8).

Se tiene así formulado el problema unidimensional que varía del caso anterior en que no hay rotación en el término de variación parabólica de la presión reducida con el radio.

4.4.2. Análisis de la Rotura

Siguiendo un proceso análogo al seguido en el apartado 4.3.1 y haciendo

$$\Omega = \sqrt{\epsilon} \omega \quad (80)$$

sólo se modifica la ecuación de perturbación correspondiente al

orden $\varepsilon^{3/2}$, quedando la ecuación (32) modificada en la forma

$$A_{\tau\tau} - \left(\frac{m\lambda}{3} + \frac{\omega^2}{6}\right)A - \frac{1}{16} A^3 = 0 \quad (81)$$

con las mismas condiciones iniciales que en el caso sin rotación, (33) y (34).

4.4.3. Solución Estacionaria

Se obtiene directamente de la ecuación (81) y viene dada por la expresión

$$\frac{m\lambda}{3} + \frac{\omega^2}{6} + \frac{A^2}{16} = 0 \quad (82)$$

debiendo ser $m = -1$, es decir, también en este caso la bifurcación es hacia atrás; se tiene, por tanto

$$\lambda = \frac{\omega^2}{2} + \frac{3}{16} A^2 \quad (83)$$

que es un paraboloide elíptico en el espacio tridimensional deformación-esbeltez-velocidad de rotación. El resultado para $A=0$ fue ya obtenido en [2] en forma más general.

4.4.4. Solución de Semejanza

Como sólo estamos interesados en el caso $\Lambda < \pi$ ($m=-1$)^{*},

* En cualquier caso, bastará tomar $\lambda < 0$ para recuperar este caso.

podemos hacer el cambio de variables

$$A = \alpha \frac{4}{\sqrt{3}} \sqrt{\left| \lambda - \frac{\omega^2}{2} \right|} \quad (84)$$

$$\tau = \theta \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{\left| \lambda - \frac{\omega^2}{2} \right|}} \quad (85)$$

quedando la ecuación (81) en la forma

$$\alpha_{\theta\theta} - m' \alpha - \alpha^3 = 0 \quad (86)$$

y las condiciones de contorno en la forma

$$\alpha(0) = \alpha_0 = \frac{A_0}{4} \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{\left| \lambda - \frac{\omega^2}{2} \right|}} \quad (87)$$

$$\alpha_{\theta}(0) = 0 \quad (88)$$

donde la variable de control, m' , es el signo de $\frac{\omega^2}{2} - \lambda$.

Como se ve, el problema (86)-(87)-(88) es enteramente similar al (50)-(51)-(52) resuelto en el apartado 4.3.3, y las conclusiones son parecidas (ver Fig. 2):

Caso $m'=1$ ($\lambda > \pi(1-\omega^2/2)$)

Las únicas soluciones de equilibrio son las cilíndricas ($\alpha=0$), pero son inestables puesto que una pequeña deformación inicial, α_0 , desencadena un movimiento divergente.

Caso $m'=-1$ ($\lambda < \pi(1-\omega^2/2)$)

Hay tres posiciones de equilibrio: $\alpha=0$ y $\alpha=\pm 1$. Si la de-

formación inicial es pequeña ($\alpha_0^2 < 1$, $\dot{\alpha}_0 = 0$) el movimiento es oscilatorio (Fig. 2) y la posición $\alpha = 0$ es estable. Para $\alpha^2 > 1$ el proceso es divergente y por tanto $\alpha = \pm 1$ (es decir, $A_0 = \frac{4}{\sqrt{3}} \sqrt{|\lambda - \frac{\omega^2}{2}|}$) corresponde a equilibrios inestables.

4.4.5. Resultados

De modo análogo a como se hizo en 4.3.4, la evolución de la amplitud puede ponerse en función de integrales elípticas de primera especie (58) y en la Tabla 2 se resumen las expresiones para los diferentes casos particulares que aparecen.

Los tiempos de rotura se obtiene haciendo $A = \infty$, y los períodos de oscilación haciendo $A = 0$ y multiplicando por 4, conforme se explicó en 4.3.4.

Tanto para el estado estacionario como para los tiempos de rotura y períodos de oscilación, sigue siendo aplicable la Fig. 3, pero cambiando la abcisa por una "esbeltez equivalente", tal que, con la misma escala, la magnitud representada sea $\frac{L}{2R} (1 + \frac{\rho \Omega^2 R^3}{2\sigma})$, correspondiente a sustituir λ por $\lambda - \frac{\omega^2}{2}$, habiendo pasado ya a variables físicas dimensionales para mayor claridad (ρ y σ son la diferencia de densidades y la tensión superficial líquido-gas).

En resumen, en el entorno de $\Lambda = \pi$, el efecto de superponer una velocidad de rotación como sólido rígido se reduce, exclusivamente, a un acortamiento de la esbeltez efectiva.

4.5. CONCLUSIONES

Se ha completado en la primera parte de este trabajo, el plano esbeltez-deformación inicial con el estudio del punto de

Tabla 2

Variación con el tiempo, τ , de la amplitud, A , correspondiente a una deformación inicial, A_0 , para zonas cilíndricas de esbeltez $\Lambda = \pi(1-\lambda)$, en isorrotación a velocidad ω .

$\lambda \leq \frac{\omega^2}{2}$	<p>(Rotura)</p> $\tau = \frac{4}{\sqrt{A_0^2 + \frac{16}{3}(\frac{\omega^2}{2} - \lambda)}} F(\arccos \frac{A_0}{A}, \arcsen \sqrt{\frac{A_0^2/2 + \frac{16}{3}(\frac{\omega^2}{2} - \lambda)}{A_0^2 + \frac{16}{3}(\frac{\omega^2}{2} - \lambda)}})$
	<p>$\frac{32}{3}(\lambda - \frac{\omega^2}{2}) \leq A_0^2$ (Rotura)</p> $\tau = \frac{4}{\sqrt{A_0^2 - \frac{16}{3}(\lambda - \frac{\omega^2}{2})}} F(\arccos \frac{A_0}{A}, \arcsen \sqrt{\frac{A_0^2/2 - \frac{16}{3}(\lambda - \frac{\omega^2}{2})}{A_0^2 - \frac{16}{3}(\lambda - \frac{\omega^2}{2})}})$
	<p>$\frac{16}{3}(\lambda - \frac{\omega^2}{2}) \leq A_0^2 \leq \frac{32}{3}(\lambda - \frac{\omega^2}{2})$ (Rotura)</p> $\tau = \frac{\sqrt{32}}{A_0} \left[F(\pi/2, \arcsen \sqrt{\frac{\frac{32}{3}(\lambda - \frac{\omega^2}{2}) - A_0^2}{A_0^2}}) - F(\arcsen \frac{A_0}{A}, \arcsen \sqrt{\frac{\frac{32}{3}(\lambda - \frac{\omega^2}{2}) - A_0^2}{A_0^2}}) \right]$
$\lambda \geq \frac{\omega^2}{2}$	<p>$0 \leq A_0^2 \leq \frac{16}{3}(\lambda - \frac{\omega^2}{2})$ (Oscilación)</p> $\tau = \sqrt{\frac{32}{\frac{32}{3}(\lambda - \frac{\omega^2}{2}) - A_0^2}} \left[F(\pi/2, \arcsen \sqrt{\frac{A_0^2}{\frac{32}{3}(\lambda - \frac{\omega^2}{2}) - A_0^2}}) - F(\arcsen \frac{A}{A_0}, \arcsen \sqrt{\frac{A_0^2}{\frac{32}{3}(\lambda - \frac{\omega^2}{2}) - A_0^2}}) \right]$

bifurcación, radicando el interés, no tanto en los resultados obtenidos, ya que el análisis numérico no lineal definió perfectamente dicho plano y, por tanto, la información obtenida aquí era conocida al menos cualitativamente, sino en la técnica de perturbaciones singulares utilizada, método de análisis que permite un estudio más completo del problema.

Efectivamente, en la segunda parte y usando dicho método se ha ampliado el plano esbeltez-deformación inicial con la introducción de un nuevo parámetro, la velocidad de rotación de la zona, parámetro de gran interés ya que en una buena parte de las utilidades industriales de la zona flotante ésta gira alrededor de su eje.

Del plano velocidad de rotación-esbeltez se conocía la solución estacionaria compuesta de dos tramos correspondientes a las soluciones no-axilsimétrica y axilsimétrica. Con el análisis aquí hecho del entorno del punto de bifurcación, entorno comprendido dentro de la zona axilsimétrica, se ha iniciado el estudio del espacio velocidad de rotación-esbeltez-deformación inicial, espacio que será necesario completar con futuros trabajos.

Es obligado comentar que la hipótesis de zona esbelta ($\Lambda \gg 1$), que ha permitido utilizar el modelo unidimensional, ha hecho también que no intervengan en el problema de la zona en rotación de esbeltez próxima a π las fuerzas de Coriolis. Se deberá entonces estudiar el entorno del punto de bifurcación sin esta restricción y comparar con los resultados aquí obtenidos para determinar la influencia de dichas fuerzas y, por tanto, el límite de validez del modelo unidimensional utilizado.

Referencias

1. Meseguer, J., "Estructura interna de la zona flotante", Tesis Doctoral, Univ. Polit. Madrid, 1981.
2. Martínez, I., "Hidrostática de la zona flotante", Tesis Doctoral, Univ. Polit. Madrid, 1978.

5. SIMULACION EN ORDENADOR DEL MODULO DE FISICA DE FLUIDOS
UTILIZADO EN LA REALIZACION DEL EXPERIMENTO 1-ES-331 EN
EL SPACELAB

5. SIMULACION EN ORDENADOR DEL MODULO DE FISICA DE FLUIDOS UTILIZADO EN LA REALIZACION DEL EXPERIMENTO 1-ES-331 EN EL SPACELAB

5.1. INTRODUCCION

El año próximo se va a realizar un experimento en el espacio, el 1-ES-331, sobre el estudio de la estabilidad de columnas líquidas, de gran interés tanto desde el punto de vista de la ciencia como por su probada aplicación en la producción de materiales puros en la industria electrónica de semiconductores. En principio el esquema simple del flujo de información es el siguiente: el investigador le da por escrito las instrucciones para llevar a cabo el experimento al astronauta que lo va a realizar en el laboratorio espacial en donde irá ubicado el aparato con el que se han de hacer los ensayos. El astronauta operador introduce en los mandos de dicho aparato los valores dados por el investigador, se realizan los ensayos, y se recogen los datos, que son devueltos al investigador para su análisis.

El esquema lineal, unidimensional, anterior es excesivamente simplista pues ni siquiera tiene en cuenta el hecho de que el astronauta es un ente pensante, un científico bien entrenado por el investigador con el que colabora inteligentemente desde hace años en toda la experimentación.

De lo que se trata aquí, es de dar unas ideas sobre las ventajas que aportaría la simulación en ordenador de todos los bloques implicados en el flujo de información, relativo no sólo a la realización propiamente dicha del experimento, sino al diseño, desarrollo y utilización de los equipos experimentales y al análisis de los resultados de la experimentación.

La utilización de ordenadores para este tipo de simulación (no se hace aquí mención a su posible uso como elemento de control automático de procesos) permitiría al investigador concentrarse en los aspectos esenciales de su investigación, suministrándole confianza en el uso de todos los aparatos y servidumbres implicadas, ahorraría costosas sesiones de familiarización y entrenamiento con los equipos reales y reduciría sensiblemente los gastos de desarrollo de los sofisticados (e inaccesibles) equipos de vuelo.

5.2. UTILIZACION DEL FPM

El diseno, desarrollo y utilización de sofisticados equipos, como el Módulo de Física de Fluidos (FPM) que volará en el primer Spacelab el próximo año, con tiempos de desarrollo del orden de cinco años y presupuestos del orden de mil millones de pesetas, podría verse ayudado en sus etapas más cruciales por una simulación apropiada en ordenador.

Por ejemplo, en el caso citado del FPM, se trata de un equipo experimental desarrollado por FIAT Centro Richerca (Italia) de acuerdo a unas especificaciones técnicas (propuestas por un conjunto de seis grupos de investigación europeos) y a unos estrictos requisitos de acomodación en el Spacelab impuestos por las firmas alemanas MBB y ERNO, amén de los severos (y difusos) criterios de compatibilidad y seguridad de la NASA.

El FPM, destinado esencialmente al manejo de zonas líquidas flotantes, ocupa 0.2 m^3 y está instalado en uno de los armarios de trabajo, el MSDR (Material Science Double Rack) del Spacelab. El MSDR suministra potencia y otros servicios al FPM,

de entre los cuales cabe reseñar el de adquisición de datos para su envío en tiempo real a tierra, donde los experimentadores supervisan la marcha de los ensayos y pueden, si el caso lo requiere, comunicar directamente con el astronauta operador y discutir los eventuales caminos a seguir en caso de dificultad. La Fig. 1 representa el intercambio de información durante la realización de los ensayos en vuelo.

La duración media de los experimentos es de unos 30 minutos, al menos en este primer vuelo, lo que obliga a una cuidadosa preparación no sólo de los astronautas, que llevan varios años de familiarización y estudio de los innumerables instrumentos y equipos de abordó y de las experiencias a desarrollar con ellos, sino sobre todo del investigador, para asegurar en todo lo posible una provechosa utilización de tan escasas y costosísimas facilidades.

Aunque nos vamos a ceñir aquí al estudio de la fase de vuelo, obviamente la más crítica, conviene resaltar la enorme importancia que tiene el uso de ordenador en las fases preparatorias de los ensayos, donde la simulación numérica acompaña a los ensayos de simulación con baño neutro en tanque de Plateau, así como en la fase posterior de análisis de los resultados obtenidos en el Spacelab, con problemas de proceso de imágenes abordables exclusivamente con ayuda de ordenador.

5.3. SIMULACION DEL OPERADOR

Los experimentos de física de fluidos suelen necesitar la intervención humana debido a la enorme cantidad de variables que entran en juego, lo que hace que la automatización sea com-

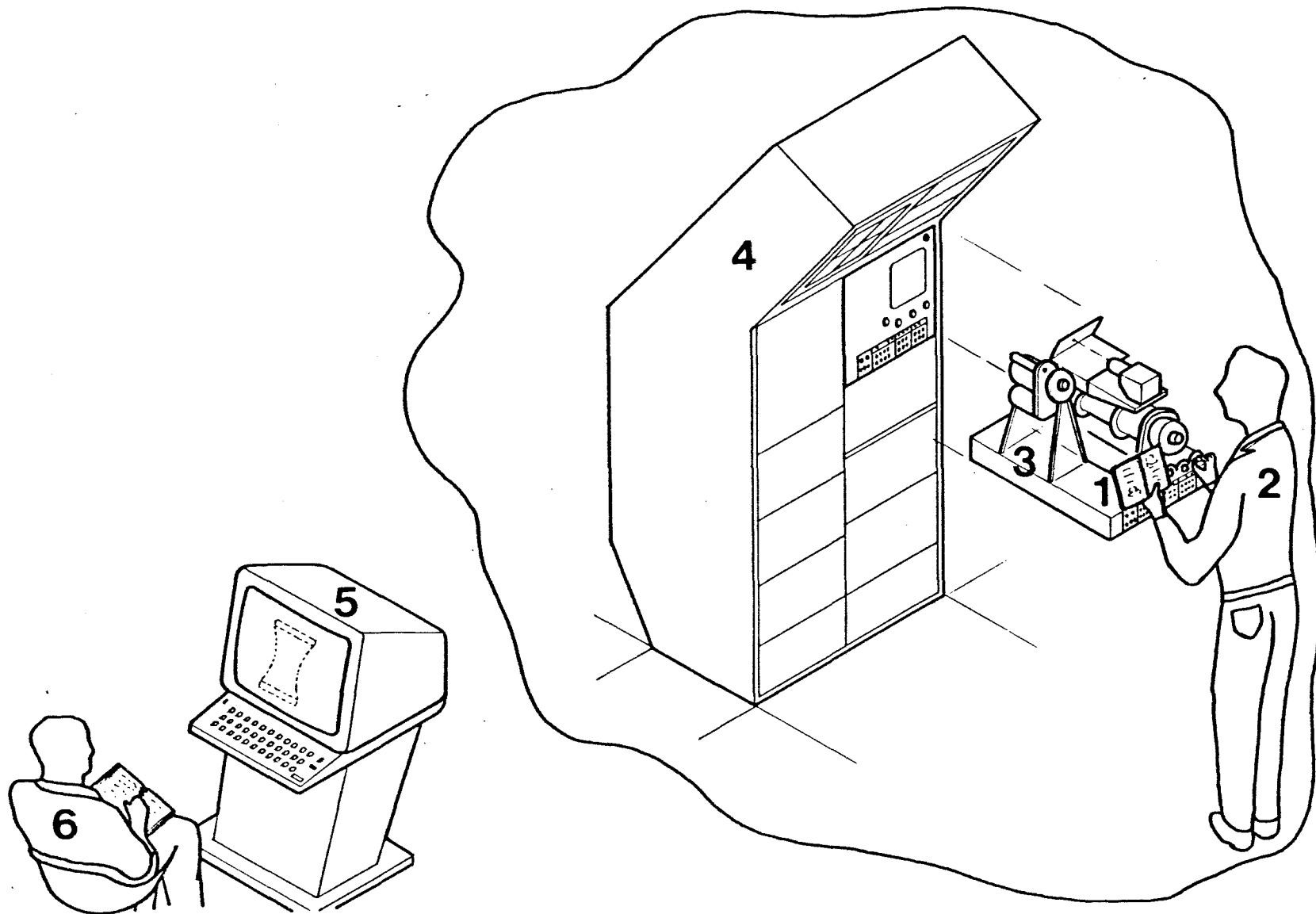


Fig. 1. Elementos que intervienen en el flujo de información durante la realización de los ensayos en vuelo: 1) Cuaderno de instrucciones, 2) Astronauta, 3) Módulo de Física de Fluidos (FPM), 4) Sistema de adquisición de datos, 5) Enlace con Tierra, 6) Investigador principal.

pleja y poco fiable. Así por ejemplo, para muchos experimentos metalúrgicos el astronauta sólo actúa esporádicamente, mientras que en todos los experimentos de fluidos se ha requerido su completa participación.

El investigador, cuenta tenida de sus deseos y de las posibilidades actuales de los equipos, traza un plan secuencial de ensayos a realizar en el Spacelab, y, tras varias reuniones con los astronautas y los constructores del FPM y del MSDR, se llega a una descripción nominal detallada paso a paso de todas las acciones necesarias: el cuaderno de instrucciones (HEP: Handbook of Experiment Procedures). Aunque la información está aquí detallada hasta el nivel de posición de todos los actuadores (Ej.: poner el marcador de imágenes a filmar en 150, poner en marcha la cámara B, etc.) se trata tan sólo de una guía de trabajo preparada conjuntamente por el investigador y el operador, que actúa como ayudante de aquél, y que está preparado para tomar las decisiones y efectuar los cambios que el curso de los ensayos aconseje para un mejor aprovechamiento de los limitados recursos, sobre todo del escaso tiempo disponible.

En la Tabla 1 se presenta una porción de las instrucciones para el desarrollo de uno de los experimentos propuestos para el primer Spacelab. En la primera columna se numeran los pasos, agrupados, que requieren una acción mecánica del operador sobre el FPM. En la segunda se describe dicha acción o se insertan los comentarios apropiados para recordatorio del operador. En la tercera se da el valor que debe figurar en el panel de mandos del FPM (Fig. 2) y que el operador deberá cambiar si no coin coincide con el actual. La cuarta columna, que no figurará en el cua

Tabla 1

Detalle del Cuaderno de Instrucciones para la realización del Exp. 331, habiendose añadido la cuarta columna como estimación del tiempo de operador necesario para su ejecución.

1.	FORMING THE ZONE			0
	Comment: crucial phase at the very begining due to the risk of jet formation. Verify a good wetting, spreading and anchorage at the edges. Aim is to follow the O-B-B-C sequence shown in Fig.1.			5
.1	Set translation: FP position (mm)	030.0		5
	FP speed (mm/s)	.999		0
	RES position (mm)	030.0		0
	RES speed (mm/s)	.999		0
	Comment: from point O to point A (Fig.1).			5
.2	Start translation			0
.3	Set translation: FP position (mm)	030.0		5
	FP speed (mm/s)	.999		0
	RES position (mm)	025.1		0
	RES speed (mm/s)	.100		0
	Comment: from point A to point B (Fig.1). First the liquid should spread over the FP until the edge is reached. Liquid contact with the RP will take place when the edge angle of the ball reaches 112°. A sudden spreading will occur. Final shape must be cylindrical.			10
.4	Set camera: camera	B		5
	mode	CINE		0
	exposure	.25		0
	interval	1		0
	frames	400		0
.5	Start camera			0
.6	Start translation			0
	CAUTION: a perfect cylindrical zone with well attached edges must be obtained. If not, inject more liquid and help with rotation or vibration. Do not forget to get back to current position.			5
.7	Set translation: FP position (mm)	100.0		5
	FP speed (mm/s)	.999		0
	RES position (mm)	091.0		0
	RES speed (mm/s)	.835		0
	Comment: from point B to point C (Fig.1). Cylindrical evolution.			2
.8	Set camera: camera	B		5
	mode	PROGR		0
	exposure	.25		0
	interval	1		0
	frames	000		0
.9	Start camera			0
.10	Start translation			0

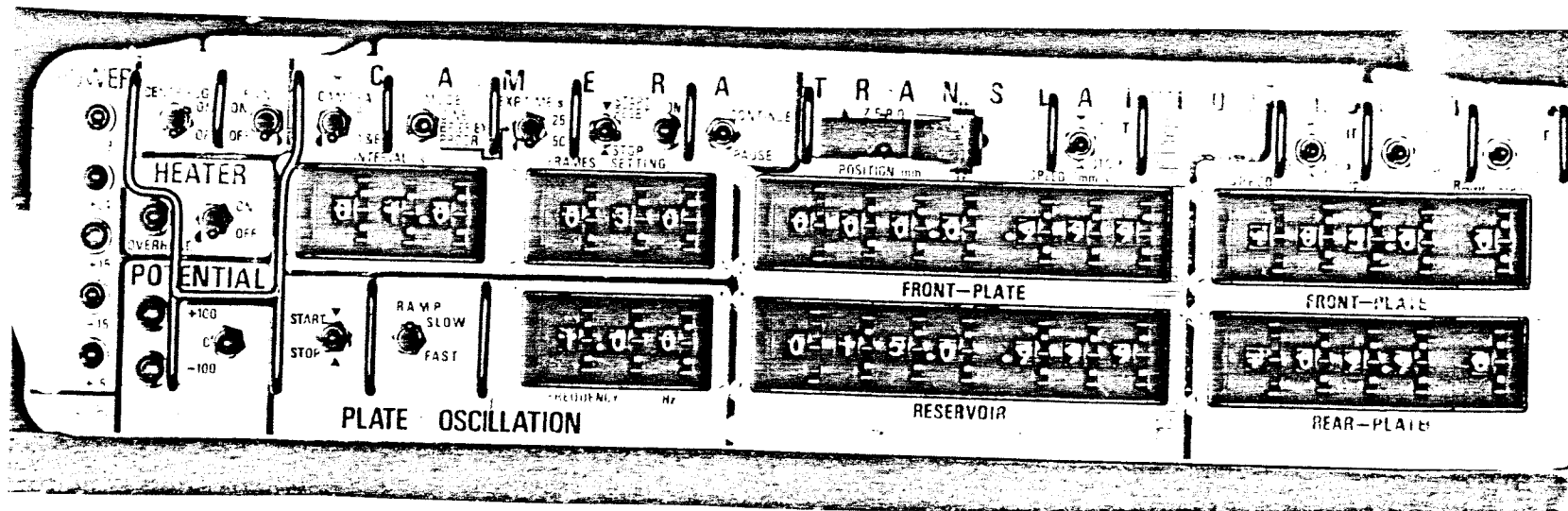


Fig. 2. Panel de mandos del Módulo de Física de Fluidos (FPM).

derno de instrucciones, da una estimación del tiempo que el operador invierte en la lectura y operación de marcar los valores apropiados, y que, como se verá a continuación sirve para la simulación de las actuaciones del operador.

La preparación de las instrucciones (sólo las nominales son ya más de 350) es una tarea árdua que exige un gran esfuerzo y muchas horas de ensayo con el FPM, lo cual resulta caro, pudiéndose beneficiar del uso de ordenador para la simulación conforme se expone a continuación.

En principio, y con objeto de hacer más sencilla la simulación, se puede simplificar la participación del operador con arreglo a los criterios siguientes: el operador lee una instrucción instantáneamente y se espera sin hacer nada tantos ciclos de tiempo (de segundo, por ejemplo) como indica la cuarta columna de la Tabla 1, manteniendo el puntero de lectura (su dedo) en la misma línea siempre. Disponiendo un contador de línea y un contador de tiempo muerto restante queda definido el modelo hasta aquí. Cuando en un ciclo se encuentre ya con el tiempo muerto agotado, el operador trata de ejecutar la instrucción en la que se quedó el puntero de línea, lo cual es siempre factible excepto si la instrucción es "Empezar nueva fase", en cuyo caso hay que ver si la ejecución de las órdenes anteriores ha concluido o no, ya que en este último caso es necesario esperar. Disponiendo una variable binaria para el estado de "Proceso en ejecución" y otra variable para el tiempo estimado de ejecución queda resuelto el modelo. Con esto se consigue aprovechar mejor el tiempo ya que las operaciones de seleccionar la posición de los marcadores se realizan mientras la fase previa se está ejecutando.

En resumen, la entrada de datos del astronauta al FPM se ha simulado por un procedimiento de ordenador, el OPE (Operator input) que, al ser interrogado por el programa principal cada cierto tiempo, suministra el estado actual del panel de mando del FPM correspondiente a la secuencia nominal de instrucciones, sin más ayuda que la de los contadores que simulan el dedo que el operador mantiene en la instrucción por la que va, y el conocimiento que el tiene del trabajo que el ha dado al FPM y lo que le va a durar llevarlo a cabo. Como se ve, es un procedimiento de entrada no interactiva que sólo requiere la señal de un reloj que marque el ritmo del experimento. Ir más lejos y tratar de simular una interacción bidireccional en la que el operador mirase al FPM o al MSDR y corrigiese su entrada de acuerdo a lo que ve y no sólo a lo que está escrito en el manual de instrucciones se sale ya del fin propuesto, que era el de tener una idea de tiempos y compatibilidades de la secuencia nominal. Como siempre, la simulación de interfases humanas sólo es rentable cuando no se incorporan los perfectos mecanismos de respuesta inteligente.

5.4. SIMULACION DEL FPM

La parte donde más se hace notar la ayuda del ordenador en la simulación del flujo de información de los experimentos es el propio FPM. Este sistema responde a las actuaciones del operador generando tres tipos de información a la salida: 1) Información in situ que suministra al operador a través de los indicadores del MSDR y, principalmente, de la ventana del FPM a través de la cual el operador tiene acceso óptico (los pro

cedimientos de ordenador DIS (Display output) y PIC (Picture output), que se explicarán a continuación, simulan esta parte). 2) Información almacenada fotográficamente en la cámara de cine del FPM para su estudio detallado tras el vuelo, la cual simula igual que la imagen que ve el operador, el cual mira desde la misma posición que la cámara. 3) Información transmitida en tiempo real a tierra, a la cual el investigador tiene acceso directo para supervisión y eventual corrección del curso de actuación del operador en vuelo. Puesto que en la base de tierra se dispone de adecuadas facilidades de proceso de la información se ha pensado en simularlas con dos procedimientos: el TEX (Text output) y el GRA (Graphic output), además de los ya descritos, como se detallará en el apartado siguiente. En la Fig. 3 puede verse un esquema general de bloques de entrada/salida.

En resumen lo que el simulador del FPM debe hacer es ir leyendo los datos que le suministra el operador (OPE) y construir con ellos, y con el modelo de comportamiento físico de las partes del FPM y de la columna líquida de trabajo, los datos que necesitan las salidas DIS, TEX, GRA y PIC.

Llegado este punto, conviene comentar la conocida pregunta: si se puede simular el operador, el FPM, la columna líquida y el resto del proceso de la información, ¿para qué ir al espacio?. La respuesta es sencilla: simular es reproducir parte del comportamiento de un sistema mediante supuestos modelos, preparados con la información que se dispone para reducir su análisis. Este proceso se puede apreciar claramente en la formación académica, donde se propone al alumno una serie de problemas sobre aspectos parciales de fenómenos físicos y se le adiestra en

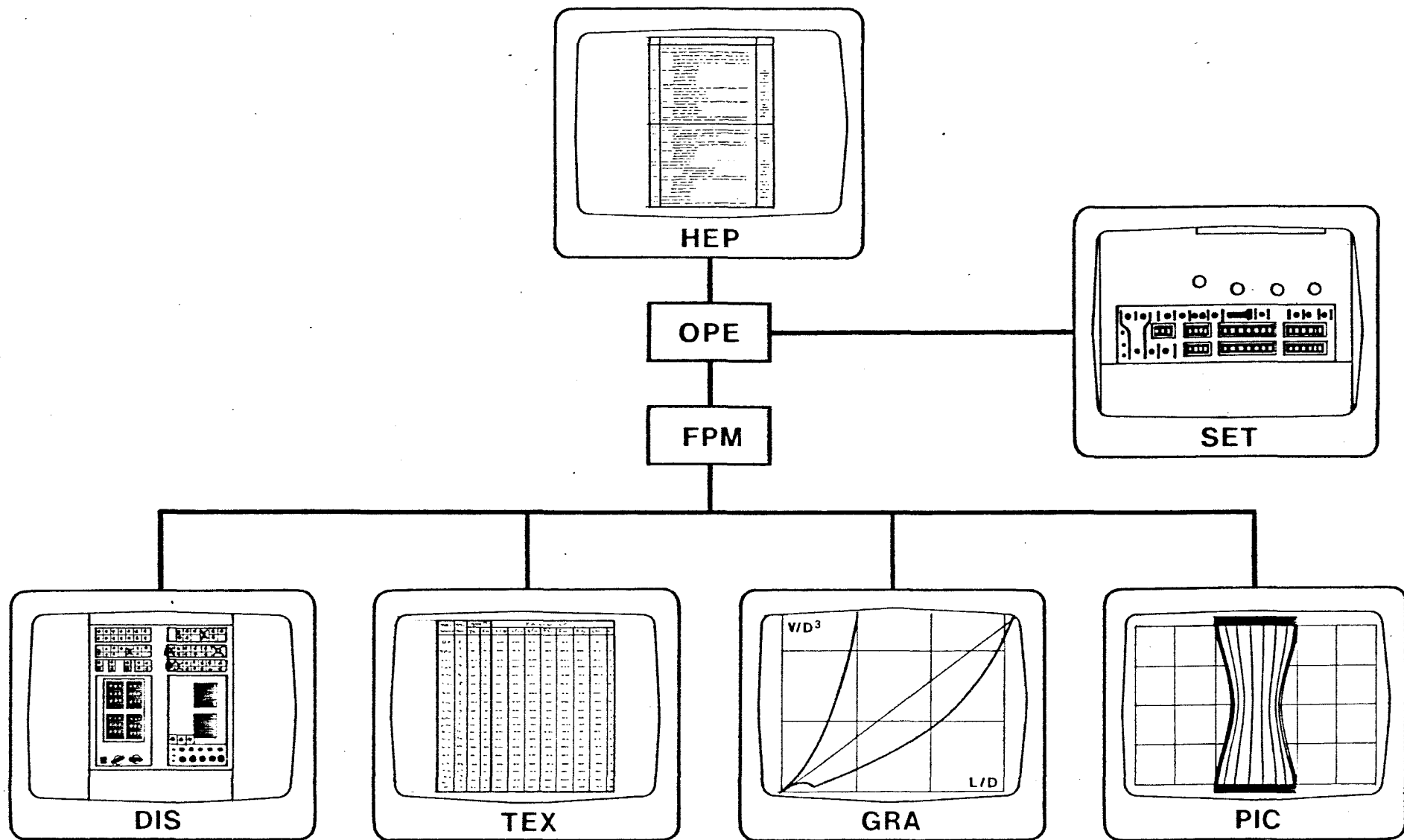


Fig. 3. Diagrama de bloques para la simulación de los experimentos en el FPM. La entrada de información es el Cuaderno de Instrucciones (HEP), y es procesada por el Operador (OPE) y el Módulo de Física de Fluidos (FPM) para suministrar diferentes salidas: visualizadores digitales (DIS), tablas numéricas (TEX), gráficos (GRA) e imágenes (PIC).

el uso de modelos basados en el conocimiento actual que de ellos se tiene (teorías) para que cuando, en el desempeño de su vida profesional, el alumno haya de enfrentarse a problemas reales, sea capaz de reducir su análisis y resolverlos.

En nuestro caso la simulación del estado del FPM es muy sencilla puesto que precisamente este apartado ha sido diseñado para que introduzca la mínima incertidumbre en los experimentos. Por lo tanto, basándonos en esa gran precisión, supondremos que la información de salida (disco vibrando, velocidad de giro de tanto y cuanto, cámara funcionando, etc.) está acoplada directamente a la de la entrada mediante ecuaciones de respuesta lineal, sin transitorios, ni ondulaciones, ni acoplamientos cruzados, ni perturbaciones exteriores.

La simulación del estado de la columna líquida es el quid del problema. El experimento 1-ES-331 está dirigido al estudio de la estabilidad de la zona líquida flotante en ingravidez. Para ello se ha pensado una configuración nominal de trabajo, un cilindro líquido esbelto, a la que se impondrán diversas sollicitaciones mecánicas (vibraciones, rotaciones, desplazamientos, etc.) cuya influencia sobre la estabilidad se trata de esclarecer. Para modelar la respuesta del líquido se vienen haciendo investigaciones desde hace varios años con el resultado siguiente: se ha conseguido un procedimiento de ordenador para la generación de las formas de equilibrio de la zona líquida (en ausencia de perturbaciones) en función de los datos de entrada al FPM, se dispone de algoritmos que proporcionan los límites de estabilidad lineal frente a variaciones de volumen de líquido, longitud de la zona, frecuencia de vibración y velocidad de rota-

ción global, se ha desarrollado un algoritmo para la dinámica de la rotura, y se ha trabajado sobre otras regiones de interés en el comportamiento de la zona líquida, pero que todavía no han dado lugar a procedimientos de ordenador.

La dificultad de la simulación numérica de problemas de mecánica de fluidos es bien conocida. Ya la hidrostática presenta grandes dificultades cuando existen superficies libres, pues, aún basándose en la simple teoría de Laplace de que el salto local de presión a través de la interfase es proporcional a la curvatura, se llega a una ecuación diferencial en derivadas parciales, de segundo orden, no lineal, y con condiciones de contorno nada fáciles de modelar. En nuestro caso, la sencilla geometría de la superficie libre simplifica mucho el problema, pese a lo cual, con los medios de que se dispone, el procedimiento consume decenas de segundos en presentar la forma de la zona que corresponde a unos valores de volumen y longitud dados, lo que lo hace impracticable para simulación en tiempo real, aunque se ha usado ampliamente en las explicaciones dadas a los astronautas durante su entrenamiento.

Cuando aparece movimiento el problema suele desbordarse. Por ejemplo, el algoritmo desarrollado para el estudio de la rotura, basado en la discretización en diferencias finitas, aún reteniendo sólo una función de una sola variable espacial (más la temporal) consumía varias horas de cálculo con los disponibles, si bien es verdad que, una vez resueltos algunos casos, se pueden generar modelos empíricos que den una idea aproximada de la secuencia de rotura sin acudir a la solución de las complejas ecuaciones de la mecánica de fluidos.

5.5. SIMULACION DE LA RECEPCION DE DATOS EN TIERRA

Suele presentarse un hecho curioso en la utilización de datos obtenidos en el espacio: el enorme coste de acceso obliga a un proceso no interactivo en el cual se recoge una masiva cantidad de datos en vuelo que se envían a tierra o se traen si la nave es recuperable, y que desborda la capacidad de tratamiento de la información, por lo que se almacena para su tratamiento en diferido, con la consecuencia de que a veces se almacena más de lo que es factible procesar y al cabo de cierto tiempo, cuando la información es ya obsoleta, se tira (caso de satélites meteorológicos y de recursos terrestres) o bien, en el mejor de los casos, se pierde la ventaja de una posible realimentación.

Examinando el caso concreto del experimento 1-ES-331, resulta que se va a realizar en dos etapas de 30 minutos cada una separadas 9 horas entre sí. Renunciar a la posibilidad de estar en contacto con el astronauta durante la realización de los ensayos en vuelo, o, como mínimo, poder intercambiar ideas con él sobre posibles modificaciones a introducir en la segunda etapa, a la luz de los resultados de la primera, sería de todo punto improcedente y supondría una infrautilización de las costosas facilidades que caracterizan el uso de un laboratorio espacial tripulado.

Los planes actuales, a un año vista del primer vuelo del Spacelab, son que los investigadores tendrán acceso inmediato a la información que sobre su experimento llegue a tierra en tiempo real así como acceso directo a la vía de comunicaciones de voz con el astronauta, además de la recepción posterior de una copia de la cinta magnética donde se registran todas las co-

municaciones (datos y voz) y de las películas fotográficas usadas en el FPM.

Debido a las peculiaridades de este primer vuelo, de carácter multidisciplinario, con desarrollo paralelo de los experimentos, los aparatos experimentales y el mismo Spacelab, los investigadores apenas han contribuido a la definición de los formatos de datos, por lo que parece imposible que el investigador pueda asimilar la información que llega sobre su experimento: unas 10 señales binarias y otros 10 valores numéricos cada segundo. Pero si se desarrolla un procedimiento adecuado de presentación selectiva de toda esa información en tiempo real y el investigador se entrena con un simulador, se hace factible ya la toma de decisiones sobre la marcha, si el desarrollo de los ensayos así lo aconsejara.

FLOATING ZONE STABILITY IN ZERO GRAVITY

Exp. 1-ES-331. Prof. I. Da Riva.

S T A T U S R E P O R T

as at 15 December 1982.

Prepared by: I. Martínez

C O N T E N T S

1. PROJECT BACKGROUND.....	1
2. EXPERIMENT BACKGROUND.....	2
3. THEORETICAL BACKGROUND.....	4
3.1. Nominal configuration.....	4
3.2. Disc separation and volume change.....	6
3.3. Establishing the zone.....	8
3.4. Axial vibration.....	10
3.5. Disc rotation.....	10
3.6. Off-axis rotation.....	15
3.7. Breaking.....	15
4. EXPERIMENT DESCRIPTION.....	18
5. EXPERIMENT PRIORITIES.....	19
6. INTEGRATION ON THE FPM.....	21
7. NOMINAL STEP BY STEP PROCEDURES.....	23
8. CONTINGENCY PROCEDURES.....	24
8.1. Safety and risk.....	24
8.2. Resources abundancy.....	24
8.3. Resources scarcity.....	25
8.4. Unexpected fluid behaviour.....	25
8.5. Operator hints.....	27
9. SUPPORT DURING FLIGHT.....	29
10. GROUND WORK.....	30
11. REFERENCES.....	31
APPENDIX: 1-ES-331 PROCEDURES.....	32

1. PROJECT BACKGROUND

In July 1974 we answered an ESA Call for Ideas suggesting experiments on the stability of floating liquid zones, following the Skylab demonstrations reported by Carruthers et al.

In September 1975 the Spanish Space Research Commission granted financial support to the project.

By that time, ESA placed a contract with Construcciones Aero-náuticas (CASA, Spain) for a preliminary design of a Fluid Physics Module (FPM) to support experiments on the stability of floating zones to be carried out in Spacelab.

In June 1976 a formal Experiment Proposal was presented to ESA with the title: "Floating Zone Stability in Zero Gravity".

A multiuser philosophy was then adopted for the development of the FPM, with six European Investigator Groups participating: two from the UK, one from Holland, one from France, one from Italy and the Spanish one. The FPM specifications were settled and the final design commanded to FIAT CR (Italy) in November 1976.

Earlier that year, we produced a technical film showing, in animated drawing, the expected behaviour of floating zones in a micro-gravity environment.

Since its presentation in April 1979 the FPM has been subjected to a continuous study to enhance its performances.

In October 1981 a proposal was presented to ESA for using the TEXUS-rocket Program for related experiments.

In July 1982 a follow-on proposal was presented for the next Spacelab D1 Mission (1985), using the Improved Fluid Physics Module.

2. EXPERIMENT BACKGROUND

Small liquid columns resulting from local melting in a solid rod are of widespread use in industry and laboratory work. The best known application is the recrystallization of highly valuable semiconductor materials to obtain large single crystals of silicon from which better and cheaper chips can be cut.

The complex interplay of physicochemical, thermodynamical and fluidmechanical phenomena demands a parceling of the problem, analysing in depth every single influence.

Our research is centred on some fluidmechanical aspects of a floating zone with a simplified geometry: a liquid bridge joining two coaxial discs. Most of the time the liquid is assumed anchored at the edged of the discs, forming an axisymmetrical interface with the surrounding atmosphere.

A basic question in a configuration like that is the knowledge of the interface shape. A simple static analysis gives the equilibrium shapes and stability limits, a sound understanding of which is a prerequisite to all subsequent work.

Once the shape known, several mechanical disturbances are applied through the supporting discs (axial vibration, independent rotation, lateral shift) and the interfacial and inner motion studied.

Handling operations impose additional problems that are a scientific challenge in themselves: liquid emerging through the filling hole in the centre of one of the discs, liquid injection, discs separation, removal, etc.

Previous work on the subject, aside from the related capillary-jet theory (from which a lot has been borrowed) and the well-known

pioneering work of Plateau, may be found in the References at the end.

Besides the above mentioned Skylab demonstrations, some experiments have been carried out on TEXUS, mainly on thermomechanical effects. Additional demonstrations seem to be scheduled for Shuttle flights before Spacelab 1.

3. THEORETICAL BACKGROUND

In order to better fix the available knowledge on the behaviour of floating zones, a division is made in the different problems envisaged and attention is focussed on each of them in turn.

3.1 Nominal configuration

An axisymmetric liquid bridge of volume V , anchored at the edges of two equal planar-discs of diameter D held a distance L apart in the presence of a gaseous atmosphere, is considered.

The nondimensional parameters that characterise the equilibrium shape are the L/D ratio and V/D^3 .

With the simplest theory, the meridian curve $r(z)$ happens to be an implicit function of the two parameters above, involving elliptic integrals, but computer procedures have been developed that solve it in a matter of seconds.

Nevertheless, a graphic solution can be easily found with the aid of the diagram in Fig. 1 in the following way. With input values L , V and D , find the corresponding point in the diagram by means of the two families: L/D (which are just radials) and V/D^3 (which are nearly straight lines). This point will be the edge of one disc, and the meridian curve of the interface is the $P=\text{const}$ line passing by. Thus, scaling this $r(z)$ so that the edge point measures $D/2$, the actual shape of the zone is obtained (only a quarter is shown because of symmetry) and even the actual liquid pressure can be quickly computed from:

$$p = p_{\text{atm}} + \frac{\sigma}{D} \frac{P}{r} \quad (1)$$

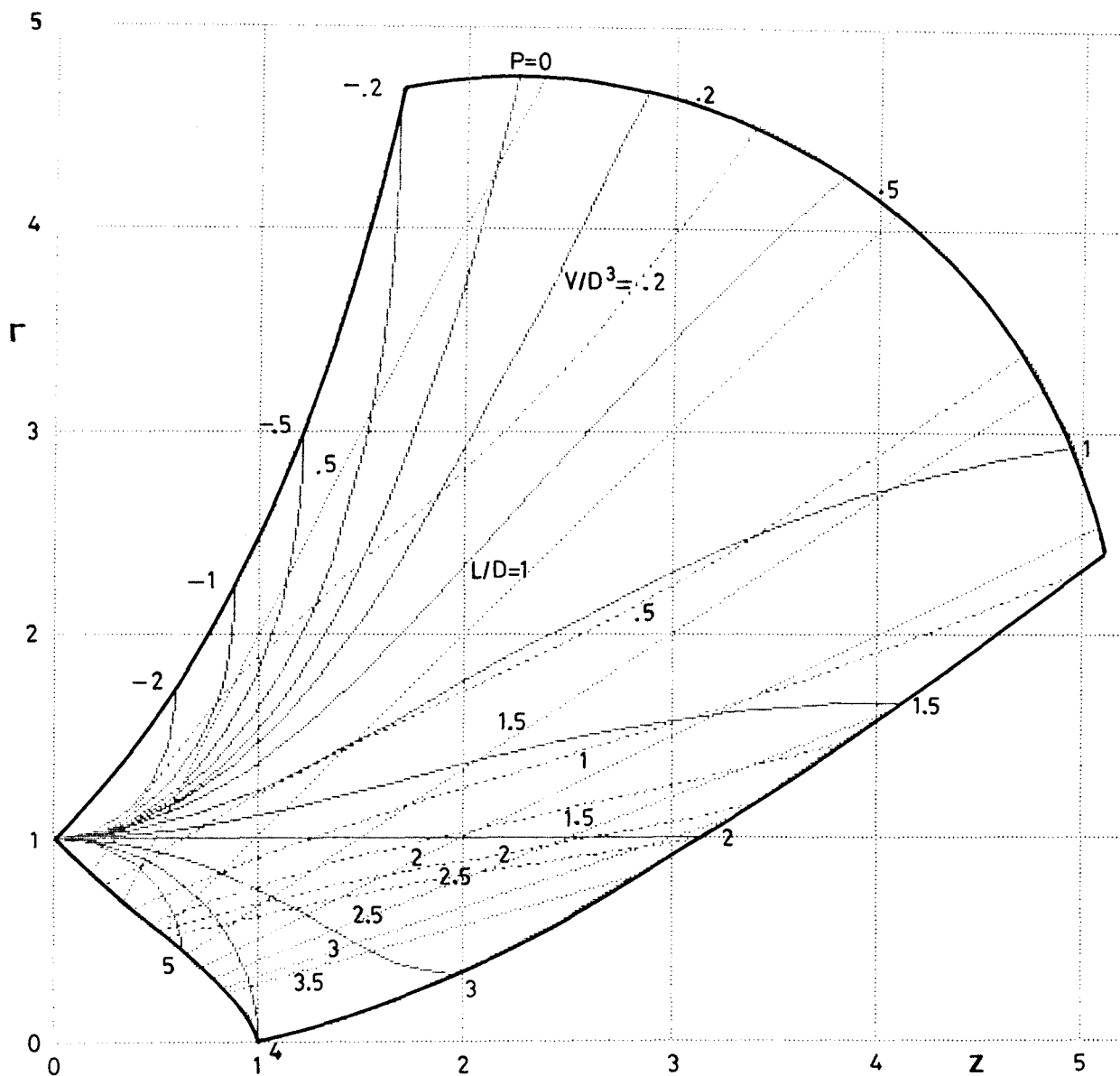


Fig. 1. Diagram for equilibrium shapes of a floating zone anchored at two equal discs of diameter D , a distance L apart, holding a liquid volume V (only half of the meridian curve is shown). Once the point $(L/D, V/D^3)$ is found, the shape coincides with the $P=\text{const}$ curve passing by, and internal pressure is given by (1).

where P and r are the nondimensional values read from Fig. 1, and σ is the surface tension.

An interesting remark is that, assuming a good wetting, the actual shape at rest does not depend on fluid properties. The dynamics on the contrary is governed by surface tension values ($\sigma=0.02 \text{ N.m}^{-1}$ for the silicone-oil/air interface), viscosities ($\nu=5.10^{-6}$ and $100.10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ for Run 1 and Run 2, respectively) and density ($\rho=920$ and 960 kg.m^{-3} , respectively). For visualization and image analysis the refractive index is also of great importance ($n=1.4$).

3.2 Disc separation and volume change

Except at high liquid-injection rates (see 3.3.), or while vibration or rotation is taking place, the dynamical effects upon the interface are negligible and a static analysis gives the approximate sequence of shapes. The formulation then is as in 3.1. and a visual acquaintance for most evolutions can be gained from Fig. 1.

Unfortunately, present computer disponibilities prevent a real-time simulation of these simple but most helpful shape changes.

Although a volume-slenderness diagram as shown in Fig. 2 may seem poorer on information (it gives no idea of shapes), it is often preferable to the r - z diagram of Fig. 1 because of its quick interpretation. The upper limit for liquid volumes has been arbitrarily chosen to correspond to an angle at the edge of 180° . The lower limit has three parts: for $L/D < 0.4$ (for zero contact angle) the liquid border recedes from the disc edge; for $L/D < 2.13$ the breaking process is symmetric to the mid-plane between discs, and for $L/D > 2.13$ the rupture is asymmetric, with an axially traveling neck.

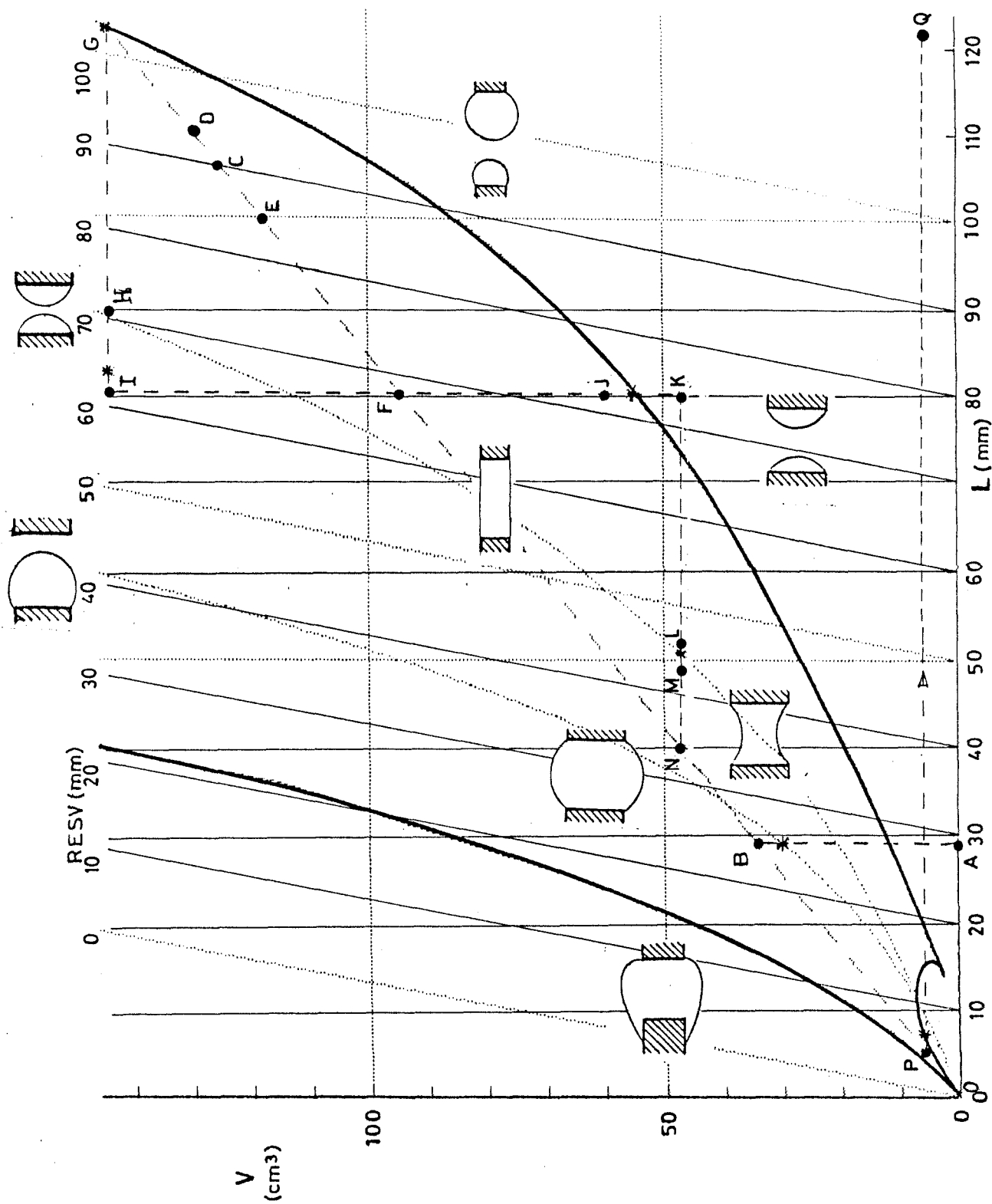


Fig. 2. Stability limits, breakage modes and sequence for Exp. 1-ES-331.

3.3 Stablising the zone

The precarious equilibrium of floating liquid zones cannot withstand gravity even less the take-off loads, thus the liquid bridge is formed when under microgravity conditions. Although other methods of establishing the zone have been suggested (axially slipping a solid shirt over a prefilled cylinder or directly putting the liquid in place with a syringe as in the Skylab demonstrations) the common way of forming the bridge is by liquid injection through a small hole at the center of one of the discs.

In the early phase of injection, the problem of emerging capillary jets comes to play, mixed with attachment and wetting conditions, Three-phase line motion, impingement on a solid wall, etc. The study is so involved that an effort beyond that of this floating zone project would be required. We here adopt an empirical approach limiting the injection rate to a small value at expenses of available time.

The injection rate being small, surface tension overcomes axial momentum and forces the emerging liquid to bend radially outwards. Should a detached jet form, the spillage following could ruin the the configuration and demand a whole cleaning procedure.

The expected behaviour for 1-ES-331 is as follows: discs are separated $3/4$ of a diameter at start, then injection proceeds, the liquid spreading over the supplier disc, anchoring at its edges, and the ball growing bigger until it touches the other disc, spreads over it and gets anchored to its edges. Choosing $L/D=3/4$ ensures the touching just before a cylindrical volume $V=\pi D^2 L/4$ is injected; a larger separation would require a big ball to touch (and the violence of it could cause overflow) and at a smaller separation the newly formed

bridge might disrupt because of excessive spreading and volume scarcity.

Once the zone established, volume changes demand for injection jets and removal sinks that can introduce unwanted perturbations. The vicinity of the interface combined with the presence of the opposite disc (and specially the anchorage condition at its edge) introduces a great difficulty in the analysis.

The case of liquid removal does not present special features, but for liquid injection a variety of situations may arise according to the value of the nondimensional parameter $\nu d/Q$, the inverse of the Reynolds number for the jet. For a given flow rate, say $Q=1\text{cm}^3/\text{s}$, and a fixed diameter of the injection hole $d=6\text{mm}$, the issuing jet would reach the opposite plate in the case of water (expanding with an angle of some 4°), would merge with the interface in the case of the silicone-oil 5 times more viscous than water (expanding with an angle of some 40°) and would be stopped just at the exit in the case of the silicone-oil 100 times viscous than water.

3.4. Axial vibration

Aside from the foreseeable relevance of carrying out controlled experiments with floating liquid zones held between oscillating discs, either axially or laterally, in phase or out of phase, there is a certitude on the occurrence of unwanted vibrations in practical handling of real zones, particularly onboard a manned Spaceclab. Well designed structural joints and dampers may diminish this effect, but the least g-jitter might have a disastrous effect on the precarious stability of large liquid columns.

From the theoretical point of view it appears that axial vi-

bration of both discs in phase is the easiest analytical task, but for an experimental approach single oscillation of one of the discs happens to be much more amenable (this capability has been implemented on the FPM); the unwanted volume distortion it conveys is negligible for small oscillation amplitudes used to validate linear analysis.

Natural frequencies for axisymmetric oscillation of a cylindrical zone have been computed using a linear, onedimensional, inviscid model and are plotted in Fig. 3. The assumptions are $a/L \ll 1$, $(L/D)^2/4 \gg 1$ and $\sqrt{\sigma D / (\rho \nu^2)} \gg 1$, where a stands for the amplitude of the oscillation and ν and ρ for viscosity and density of the liquid.

3.5. Disc rotation

Rotation is imposed in floating zone applications to enhance temperature uniformity, but it also provides a convenient method of destabilizing the precarious interface equilibrium. The well known Skylab demonstrations with liquid columns mostly dealt with rotation effects; it was there that the novel bifurcation mode towards C-shape configurations was detected.

Static effects of solid-body rotation on the equilibrium shape seem to slightly distort it so that the mid-plane radius (be it a neck or a buldge) approaches the disc radius.

For cylindrical zones, where rotation has no distorting effect on shape, the modification of stability limits are of a great scientific interest and can be found in Fig. 4. As shown, very long zones ($L/D \gg \sqrt{3}\pi/2$) loose their stability by bifurcation towards axisymmetric, amphora-like, unstable shapes, whereas shorter zones bifurcate towards non-axisymmetric unstable shapes: the so called C-mode. More work is presently being done on the dynamics of the subsequent

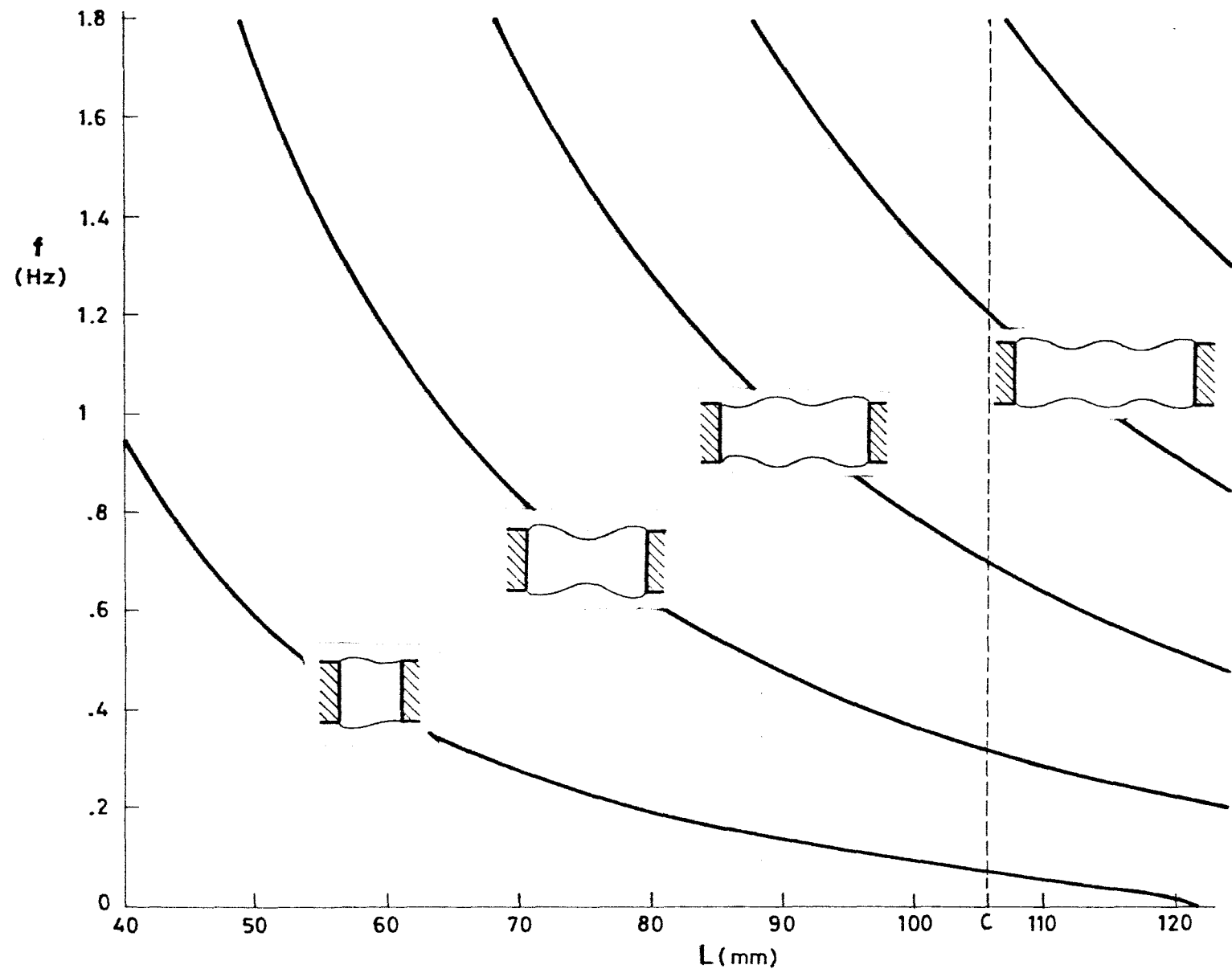


Fig. 3. Natural frequencies for a long cylindrical zone. Working point at C.

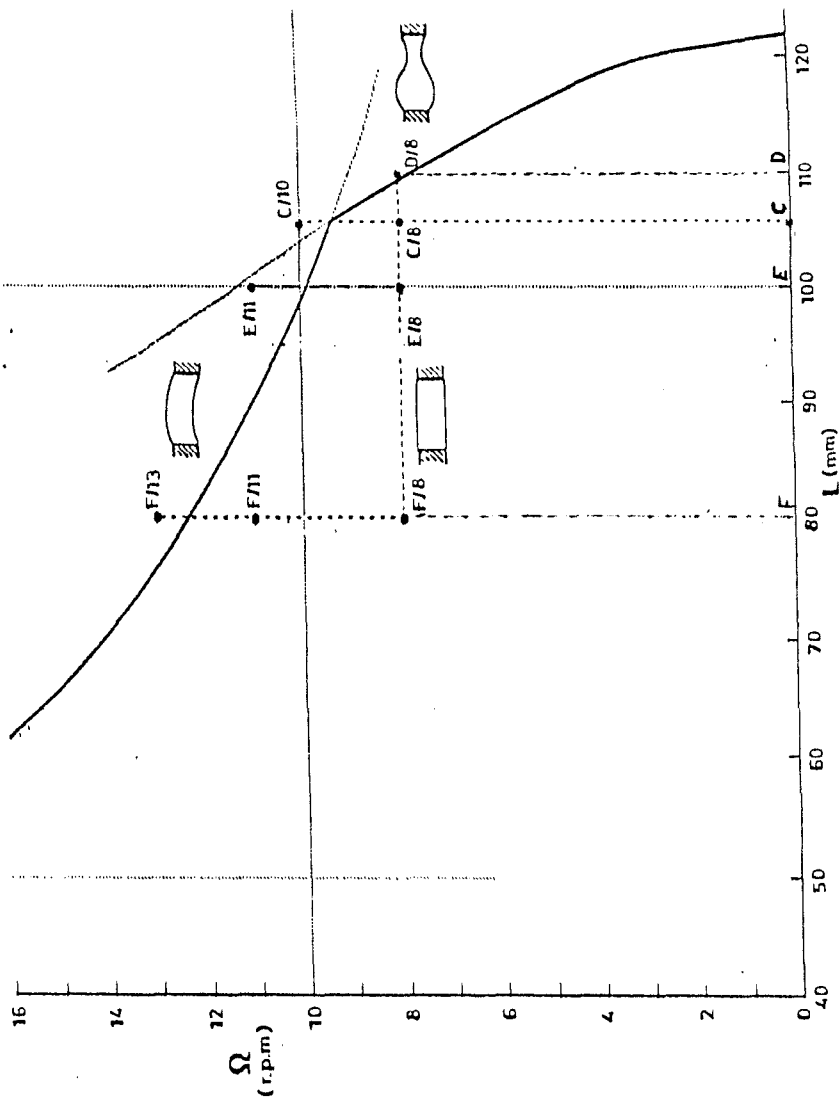


Fig. 4. Stability diagram for cylindrical zones in isototation.

evolution.

When a velocity field exists, distinct to solid-body rotation, the analysis gets much involved. Transitory effects in a cylindrical zone have been studied for short times after the onset of disc rotation (for a fraction of a revolution) and predict a radial outflow (and the appearance of a boundary layer of thickness $\sqrt{\nu t}$) that tend to bend the interface in the corner region but without too much influencing the close proximity of the attachment line. The capillary overpressure due to this bending forces the flow round the corner to leave the disc boundary layer and form a free-boundary-layer stream. the steady state presumably has the same flow structure, with well-developed Ekman boundary layers of thickness $\sqrt{\nu/\Omega}$, a larger interface layer and a nearly quiescent internal core (Fig. 5). The transitory time should be of order $D/\sqrt{\nu\Omega}$.

A lot of related available knowledge on the effects of rotation concerns the so called linear spinup, where a (cylindrical) zone already rotating as a solid body is subjected to a small jump in the rotation speed of one or both of the discs.

3.6. Off-axis rotation

Skylab demonstrations posed the question of the influence of disc alignment on the onset of the C-mode deformation in a rotating cylindrical zone. To this aim, a disc disalignment capability was provided at the FPM to be used as a well controlled perturbation method to detect this effect. Were the distortion be due to an eccentric rotation of one of the discs, the centrifugal force would certainly tend to boost this skipping-rope-like motion, but with only a non-coaxial setup the question is not transparent.

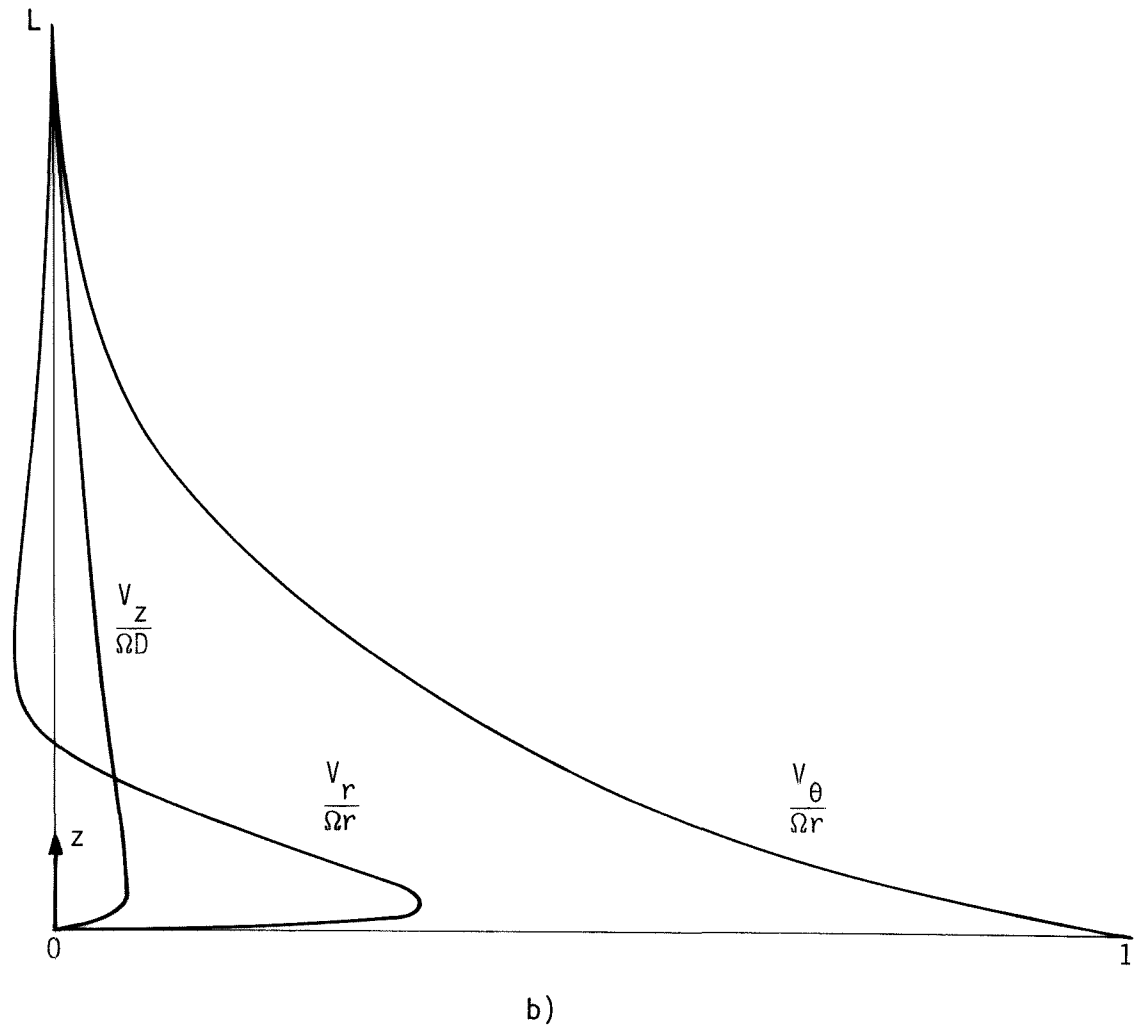
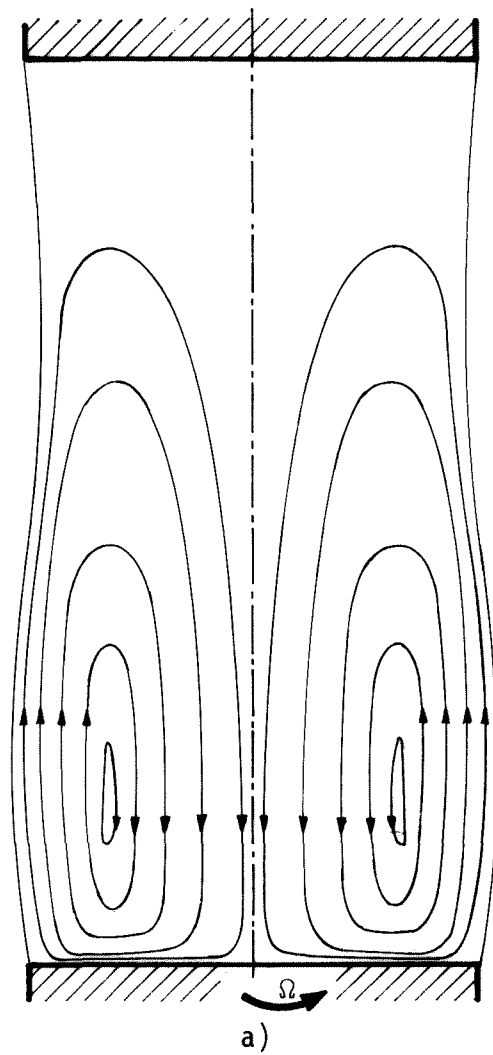


Fig. 5. Sketch of the motion induced by single rotation of one disc. a), flow pattern; b), representative velocities at mid radii.

The approach adopted in this stage of the experiment is to go and see what happens, the analysis being so involved

3.7. Breaking

The evolution of the liquid during a controlled bridge disruption has been numerically studied for long axisymmetric zones. Fig. 6 shows the results for a cylindrical column of $L/D=3.13$ after an imposed shape distortion that exceeds the stability margin, liquid volume kept constant.

The breaking sequence may be divided in two parts: before and after bridge disruption. In the first phase the liquid motion diverges, with a very low start (heavily dependent of distortion amplitude) and an exponential growth until the neck attains molecular dimensions. During the second period, the motion generated in the first is dissipated by viscosity in the damped oscillations that end in two spherical drops one attached to each disc (a small detached droplet is also formed in the necking process).

This multiscale behaviour renders highly cumbersome the monitoring and recording of the evolution when the shortage of film and cre-time is taking into account.

In practice, a cylindrical column will break before the $L/D=\pi$ limit is reached, because of uncontrolled disturbances: crew movements, motor and camera induced vibrations, residual motion due to filling, liquid inhomogeneities, surrounding air currents, etc. Within the present theory, if a controlled deformation were imposed, the oscillation period or breaking time, according to the selected amplitude, would be as shown in Fig. 7.

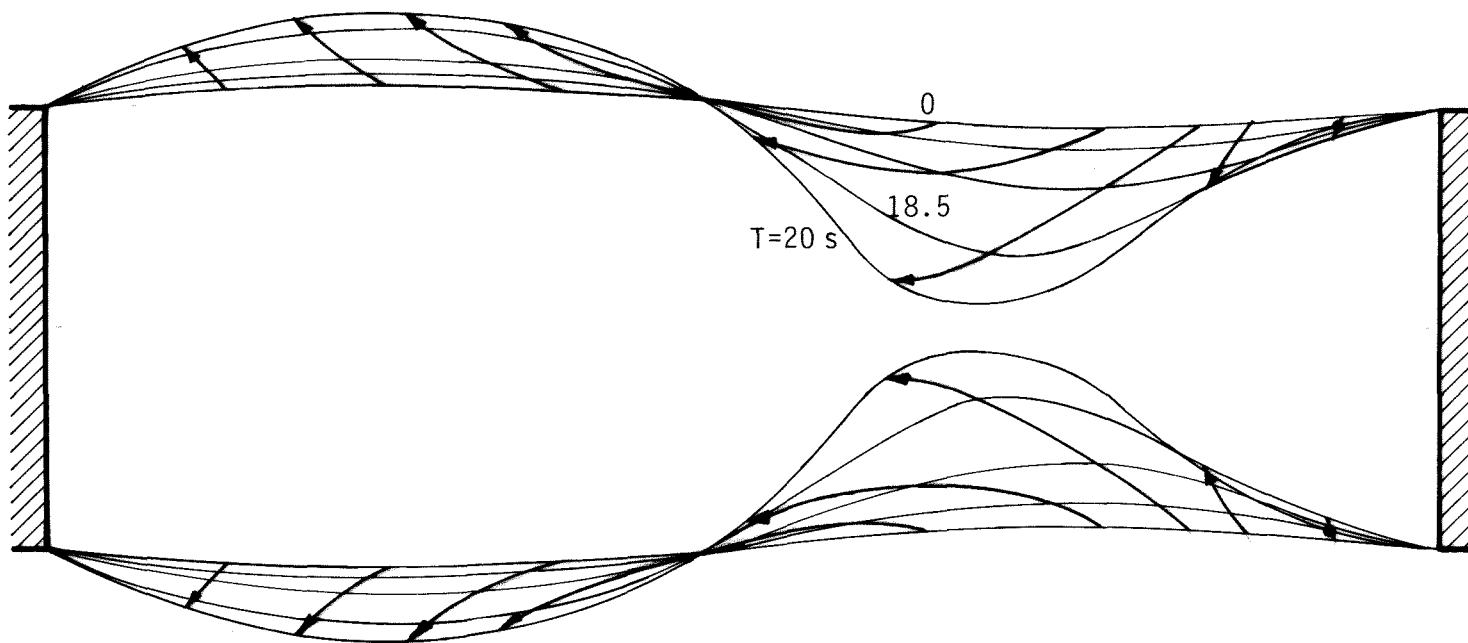


Fig. 6. Breaking of an initially cylindrical zone near the stability limit by numerical simulation of a onedimensional inviscid theory. $L/D=3.13$, $(D-D_m)/D=0.1$; times in seconds. Trajectories of surface tracers shown.

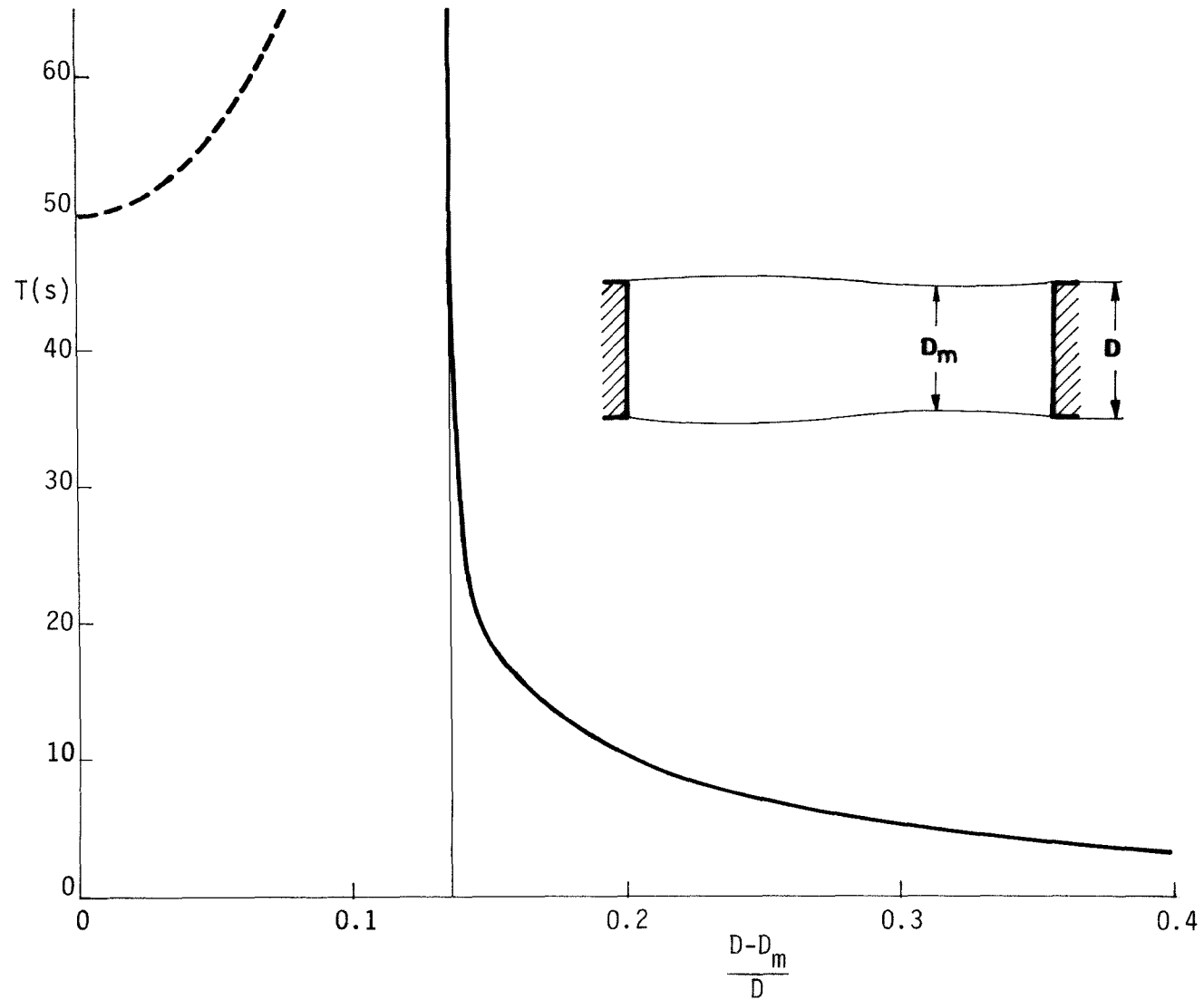


Fig. 7. Breaking time, T_B , of an initially cylindrical zone versus imposed necking, $(D-D_m)/D$, for $L/D=3.1$, $D=40$ mm and silicone oil as working liquid. The zone is stable for small disturbances and then the oscillation period is shown.

4. EXPERIMENT DESCRIPTION

Major steps in Experiment 1-ES-331 are:

<u>Forming the zone</u>	Inject liquid from a reservoir to the test site, forming a long cylindrical zone. Verify anchoring and cylindricity.
<u>Axial oscillation</u>	Impose a small amplitude oscillation to a plate near the first natural frequency of the liquid column. Sweep through a wide frequency range looking for standing waves.
<u>Single rotation</u>	Sudden spinup of one disc. Vortex rings will slowly extend from that to the opposite disc.
<u>Counterrotation</u>	Two similar cell patterns with vortex rings more intense near the discs will develop.
<u>Isorotation</u>	Solid-body rotation of the liquid must be achieved, and then synchronous spin jumps given so as to explore the transition from cylindrical rotation to C-mode and amphora-like deformations (slightly surpassing the stability limit).
<u>Disalignment</u>	Lateral displacement of one disc while still in isorotation to further stimulate nonaxisymmetric deformations.
<u>Breaking</u>	Two well-controlled bridge ruptures are foreseen following quasistatic evolutions. First a cylindrical stretching is pursued until surpassing the $L/D =$ stability limit. After merging the drops, another disruption is achieved by liquid removal at constant disc separation.
<u>Recovery</u>	Finally, as much liquid as possible is sucked back into the reservoir and a small bridge is broken by disc separation at constant volume to have a safe ending (sucking bubbles would be disastrous).

5. EXPERIMENT PRIORITIES

After a consideration of the peculiarities of this first Spacelab mission and the specific aims of this particular experiment, the following priority list has been adopted to serve as a guide for contingency procedures.

1. Obtain a long cylindrical column with well attached borders.
2. Record a controlled cylindrical rupture.
3. Excite a C-mode deformation of a cylindrical column in solid-body rotation.
4. Record unexpected fluid behaviour.
5. Record a C-mode sequence.
6. Record a symmetric breaking.
7. See if disc-misalignment triggers C-mode deformation.
8. Find natural frequencies for axial vibration of a long cylindrical column.
9. Record steady motion due to single disc rotation.
10. Record steady counterrotation.
11. Record liquid spreading over the discs.
12. Record drop merging.

In order to have an overall view of resources allocation, envisaged risks and priority ranking, Table 1 has been produced. From a look at it, it is our belief that a nominal script as the one here supplied, a spare blank script to record actual settings, and a couple of diagrams (Figs. 1 and 3 of the Procedures) are enough for the flight performance.

6. EXPERIMENT INTEGRATION ON THE FPM

The Fluid Physics Module has been specifically designed to support floating zone experiments onboard Spacelab. According to the different phases of the mission, the following configurations can be distinguished:

- Transportation: handling on Earth, launch and landing.
- In orbit: not in use, but a broad test has been performed.
- Ready for use: tools placed handly on front-panel back.
- Experiment: during preparation, operation and termination of each experiment.

The easiest way was to start and end every experiment with a Ready-for-use configuration, however, in order to save time, direct experiment-experiment interfacing has been allowed. The timelining adopted (Table 2) is a compromise solution where preference is given to the less contaminant experiments, and where second runs are scheduled after every investigator has had a first run.

Table 1. Resources needed by FPM experiments.

Time hr:min	Exp. run	Principal Investigator	Liquid volume [cc]	Plates(1) & devices	Crew time nom. min.	Film no. type
55:04	5	Vneeburg	Enclosed	Five RD5s	90	3 2476
59:15	2.1	Haynes	DMS-5 50	FD2 +RD2	65	.5 2415
65:54	4.1	Padday	DMS-5 100	FD4 +RD4	80	1 2415
86:00	1	Rodot	DMS-5 50	FD1 +RD1	55	2 2415
97:35	3.1	Napolitano	DMS-5-T 250	FD60+RD60	60	1.5 ² 2476
107:30	6.1	Da Riva	DMS-5-T 150	FD37+RD37	55 15	1 2476
110:12	4.2	Padday	DMS-100-T 400	FD4 +RD4	75	1 2415
133:25	2.2	Haynes	DMS-100-T 50	FD2 +RD2	65	.5 2415
143:40	3.2	Napolitano	DMS-100-T 250	FD60+RD60	65	1.5 ² 2476
158:03	6.2	Da Riva	DMS-100-T 150	FD60+RD60	50 15	1 2476
160:33	7	Haynes	Enclosed	FD7 +RD7	70	1 2415

(1) FD=Front Device, RD=Rear Device.

² One half of a casset is for camera R.

From the user's point of view, the Experiment phase is split-
ted as follows:

- Preparation: installation of film cassettes, liquid reservoirs, end discs or special devices, electrical conditioning, etc.
- Operation: start data acquisition, select settings, activate actuators, monitor and record.
- Termination: cleaning throughout, removal and store.

Its well known from ground based work how troublesome the initial and final handling stages are. Success in forming the zone seems to require a sound expertise, excellent visibility and patience. The remote visual access provided by the FPM may be a severe handicap in this crucial phase. The cleaning stage, though even more cumbersome, takes place at the end and seems not so crucial provided an extreme cleanliness is not demanded. In any case, a good provision of highly absorbent tissue, some of it prewetted with appropriate solvents, must be accounted for.

Cleanliness requirements in Exp. 1-ES-331 are low: just to ensure a perfect attachment at the disc edges. Care must be taken to avoid liquid spreading beyond the disc edge at critical stages such as when first touching the rear disc and during breaking and merging, when large and violent movements take place.

7. NOMINAL STEP BY STEP PROCEDURES

Two runs of nearly one hour each are scheduled for this experiment in Spacelab 1. They are quite the same except that Run 1 is performed with a low viscosity liquid, silicone oil of $5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ against $100 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ for Run 2 (that of water is $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

Some FPM capabilities have been discarded due to operational constraints, namely:

- No use is made of the automatic cleaning system
- No use is made of the electrical potential system
- No use is made of the thermal system
- No use is made of camera A and the axial viewing system
- No use is made of the background illumination system

The detailed nominal procedures are given in the Appendix.

Additional guidelines to be kept in mind for this experiment are:

- Only the 38.8mm-diameter discs are used
- One full film-cassette is used in each run
- Camera operation is taken as sequence marker, thus automatic stop should be awaited before the start of a new sequence, though future settings should be made meanwhile to save time if this does not compromise a safe visual monitoring of liquid behaviour
- Normal filming is at 1 fps in BRIEF mode (exposure time: 1/20s), with manual changes to CINE (exposure time: 1/25s) at special events. Another fully manual change is requested at the beginning of every scene to PROGR mode (exposure time of 1/2s) in order to overexpose the first frame for usage as a record marker

8. CONTINGENCY PROCEDURES

The purpose here is to give some crew training guidelines and not to present the step by step sequence to be followed after a contingency arises during flight operation.

8.1. Safety and risk

Operation of this experiment is safe under all foreseeable circumstances, for the crew, the rest of the equipment and the other experiences following in the FPM.

The worst case would be a major liquid spillage at a late stage in the run where some 150cm^3 at the most could get out of control and need a full cleaning that might cause several minutes overtime for FPM clearance.

8.2. Resources abundancy

Crew time is the most valuable resource and will be eagerly collected. A lot of time has been devoted to crew training to ensure his mastery of the experiment, thus he is prepared to pursue the research if time were available. In particular, the scarce checkpoints selected for verification of stability limits could be increased. Availability of a video recording system would doubtless give way to demonstrations of the highest scientific and educational value.

On the other hand, although usage of the axial viewing system was given up, filming additional sequences with this recording system (mostly of rotation phases) would surely benefit the post-flight data analysis.

8.3. Resources scarcity

A crewman with just 15 minutes available and the minimum power required to operate the FPM (some 140 W) is enough to get valuable scientific results even without any other data acquisition than a pencil and a noteboock.

Crew time is by far the most important resource for this experiment. Crewtime shortage would impose severe cuts to its outcome. To cope with such a situation, first the experiment priorities should be consulted, and a decision taken according to actual status (before Run 1, in Run 1, after Run 1, in Run 2), goals accomplished (none, some, most) and time available. For instance, should a time shortage be realised during Run 1, evaluation of the time to abort (or quickly end, or continue) is required to discern if it is worth going on and forget about Run 2, or have a second chance later, with a wonderfull time to think, at the expenses of more setup and cleanup time to waste.

Total lack of buil-in filming capabilities should be overcome by some video recording or at least a series of pictures taken with Spacelab common equipment.

8.4. Unexpected fluid behaviour

Uncontrolled mechanical noise throughout the experiment operation and unpredictable exact timing of crucial human intervention will certainly yield to some deviation from the expected fluid behaviour.

The worst foreseeable event able to occur is a massive liquid spilling by centrifugation, when at the most 150cm^3 might dettach from the discs and get smashed over the optical windows and the rest

of test-chamber walls. Even from this apparent mesh a well-trained operator should recover, and it is only for the estimated delay it would cause (some 15 minutes in the worst case) that the crewman is strongly requested to pay attention at avoiding it.

From this extreme situation of distress to the safe, well-controlled, breakage event scheduled there is a gradation in the consequences of liquid misbehaviour, perhaps with a representative case being a small liquid overflow beyond the disc edge, most probable to take place in the front disc because of its small heel (0.5mm against 8mm for the rear disc).

The envisaged procedure to recover from such situations may be as follows: first catch the maximum amount of liquid, without compromising the fitness of the liquid in the reservoir, by normal FPM operation using the axial movement to merge liquid masses and the rotation one to center them if needed, all in the best working conditions (running camera B at 99.9s between frames with background and meridian-plane illumination). Then do a quick spinning of the front disc at full speed to clear it from liquid lumps, close down everything, pull out the FPM, open the test chamber and proceed to a manual cleaning first with highly absorbent disposal tissue and after with some other prewetted with a suitable solvent.

During the cylindrical stretching from point B to C (Fig. 1 in the Appendix) there is a risk of breakage due to uncontrolled mechanical noise. It will take less than a minute to a skilled operator to regain the bridge configuration by forcing the merging. The process should be tried once more with more care and, if it keeps on breaking before point C is reached, a new working point must be selected, always with a cylindrical volume, at the maximum disc sep-

aration compatible with a handy, good-enough cylindrical shape (say less than 10% of radial deformation). All values following in the Procedures would need to be remade, but an acceptable accuracy can be obtained by direct graphical computation using the detailed diagrams provided.

8.5. Operator hints.

Stability limits given in Figs. 1 and 3 (Appendix) apply to an undisturbed liquid column. Most probable, a need will arise during flight for some corrections to be made on those figures. Besides, the operator must always keep in mind the aims and not the numbers supplied which are just indicative.

After a good training with the FPM, some simple hints allow an experienced person to redo, in real time, all the figures given in the Procedures, what is good indeed, because the operator attention is then concentrated in what he is actually doing and not wasting time reading odd numbers in the Procedures.

1. Just keep Figs. 1, and 3 as master sheets (Fig. 2 is too simple to merit it); spares are provided just in case. Think of the stability limits as upper bounds.

2. All FPposition settings are primary inputs to be selected by the operator. Thus, FPposition=29.1mm seems a good choice to prepare for bridge formation, but has not an intrinsic meaning apart of being $\frac{3}{4}$ of the diameter. FPposition= 105.6mm was chosen to coincide with the discontinuity found in Fig. 3, but uncontrolled disturbances will change the latter. FPposition=80mm just means a long zone short enough for the rupture to be symmetric, etc.

3. All RESposition settings are subsidiary of the FP ones. A

cylindrical zone demands for $RES_{position} = 0.846 * FP_{position}$. Liquid injection without disc separation is achieved by reducing $RES_{position}$ (pushing the reservoir) at constant disc separation. Disc separation without liquid injection is achieved by increasing both $FP_{position}$ and $RES_{position}$ in the same amount.

4. Two different aims may dictate translational speed values. If a quasistatic evolution is sought for, small injection velocities ($FP_{speed} - RES_{speed} < 0.1 \text{ mm/s}$) are set. If saving time is wanted the maximum safe speed ($< 0.5 \text{ mm/s}$) is used. A cylindrical evolution needs $RES_{speed} = 0.846 * FP_{speed}$ as for positions. Should a position (FP or RES) remain unchanged, the corresponding speed has no meaning.

5. Values for the disc-oscillation phase are ease to remember being extreme in the available range.

6. Single disc rotation and discs counterrotation are isolated. Main aim is on getting solid-body rotation of the liquid and explore its deformation modes; the target is to experimentally find the stability-limit curve given in Fig. 3, by looking at four of its points (at column slendernesses corresponding to points C, D, E and F in Fig. 3).

7. Correlating pictures after flight is going to be a burden although voice recording will help a lot, but is not enough. However, after some practice, it is quite easy to manually overexpose a frame after every shooting. Camera operation must be mastered to get the most. Spare time and frames are provided in the nominal procedures. Should an unexpected event take place, immediately change to CINE mode and be ready to reSTART camera operation after the small set of allocated frames has been exhausted, if it really worths.

9. SUPPORT DURING FLIGHT

The flow of information in this fluidmechanical experiment has a characteristic time of the order of $1s$, unlike some metallurgical companions best analysed off-line when everything has taken place. The operator here may (must!) interact and control the sequence of events in a real-time feedback.

The above fact, plus the opportunity offered by the sophisticated communication links provided for Spacelab, allows the investigator to follow the results of his experiment as it is proceeding and, should the case so demand, give an invaluable help to the crewman for correction on spot of the trials, with the consequent improved scientific return.

Information is visually gathered by the operator, who must transmit it down to the principal investigator via a two-way voice link which, supplemented with the stream of housekeeping data of mechanical parameters, must serve to evaluate in real-time the course of the experiment.

10. GROUND WORK

Since 1975, a steady work force (over one man per year) has been devoted to the study of the stability of floating liquid zones in microgravity, mainly focussed on the preparation of the Spacelab Exp. 1-ES-331, but within a much wider scope, considering different geometrical configurations and additional disturbances.

The unexpected stretching on the timelining, imposed by the successive launching delays, has given way to the development of a wide body of related knowledge that, though perhaps of no direct use in this experiment, served as a stimulus to further research and provided useful by-products during the course of the work, such as an expertise on different branches of numerical analysis, computer simulation, experimental techniques, flow visualization, etc. that are now available and shared by half a dozen people in our group.

Thus, besides the theoretical background described in paragraph 3, this experiment is backed up by a dedicated software for computation and graphic presentation of floating zone profiles, and by several test-rigs specially built for the purpose, among which a large Plateau Tank Facility may worth mentioning.

Finally, a great effort has been devoted to FPM design evaluation (where more work is still needed) and to the extensive crew training that this kind of human-controlled experiment demands.

10. REFERENCES

- 1974 Benz, R.W. "Single Crystals of Electronic Materials Grown in Space Environment". ESRP SP-101, 163-170
- 1972 Carruthers, J.C. & Grasso, M. "Studies of Floating Liquid Zones in Simulated Zero Gravity". J. Appl. Phys. 43, 436-445
- 1975 Carruthers, J.R. et al. "Studies of Rotating Liquid Floating Zones on Skylab IV". AIAA Paper 75-692
- 1977 Carruthers, J.R. et al. "Studies of Rotating Liquid Floating Zones on Skylab IV". Progress Astro. Aero. Sci., 207-221
- 1977 Coniell, S.R., Hardy, S.O. & Cordes, M.R. "Stability of Liquid Zones". J. Colloid Interf. Sci. 50, 126-136
- 1980 Da Riva, I. & Manzano, O.R. "Impulsive Motion of the Floating Zone". Europhysics Conference Abstracts 3F, 53-55
- 1979 Da Riva, I. & Martinez, I. "Floating Zone Stability. (Exp. 1-ES-331)". ESRP SP-142, 67-74
- 1978 Da Riva, I. & Meseguer, J. "On the Structure of the Floating Zone in Melting". Acta Astronautica 5, 637-653
- 1976 Da Riva, I. & Ruessga, J.H. "Fluid Physics Module Experiments". ESR SP-114, 265-276
- 1970 Eile, M.A., Gillette, R.D. & Dyson, D.C. "Stability of Interfaces of Revolution with Constant Surface Tension. The Case of the Catenoid". Chem. Eng. J. 1, 97-109
- 1982 Eyser, A., Kolbasen, B.O. & Hutsche, R. "Floating Zone Growth of Silicon Single Crystals in a Double-ellipsoid Mirror Furnace". J. Crystal Growth 57, 145-154
- 1979 Fowle, A.A. et al. "Experiments on the Stability of Conical and Cylindrical Liquid Columns at Low Bond Numbers". ESRP SP-142, 317-326
- 1971 Gillette, R.D. & Dyson, D.C. "Stability of Fluid Interfaces of Revolution Between Equal Solid Circular Plates". Chem. Eng. J. 2, 44-54
- 1952 Gillis, J. & Suh, K.S. "Stability of a Rotating Liquid Column". Phys. Fluids 5, 1149-1155
- 1961 Gillis, J. "Stability of a Column of Rotating Viscous Liquid". Proc. Camb. Phil. Soc. 57, 152-157
- 1970 Haynes, J.H. "Stability of a Fluid Cylinder". J. Colloid Interf. Sci. 32, 652-654
- 1953 Hocking, L.M. & Michael, D.H. "The Stability of a Column of Rotating Liquid". Mathematika 6, 25-32
- 1978 Martinez, I. "Floating Zone. Equilibrium Shapes and Stability Criteria". COSPAR Space Research, XVIII, 519-522
- 1981 Martinez, I. & Rivas, D. "Plateau Tank Facility for Simulation of Spacelab Experiments". IAF-81-153
- 1976 Martinez, I. "Floating Zone under Reduced Gravity. Axisymmetric Equilibrium Shapes". ESRP SP-114, 277-282
- 1979 Martinez, I. "Fluid Physics Module Utilization Brochure". ESRP-0
- 1978 Martinez, I. "Hidrostática de la zona flotante". Tesis Doctoral, Univ. Politécnica de Madrid
- 1970 Mason, G. "An Experimental Determination of the Stable Length of Cylindrical Liquid Bubbles". J. Colloid Interf. Sci. 32, 172-176
- 1976 Natkowsky, B.J. & Siegmund, H.L. "The Flow Between Counter-Rotating Disks at High Reynolds Number". SIAM J. Appl. Math. 30, 720-727
- 1981 Meseguer, J. "Estructura interna de la zona flotante". Tesis Doctoral, Univ. Politécnica de Madrid
- 1982 Meseguer, J. "On the Breakage of Axisymmetric Slender Liquid Bridges". J. Fluid Mech. (in press)
- 1981 Michael, D.H. "Meniscus Stability". Ann. Rev. Fluid Mech. 13, 189-215
- 1982 Ngan, C.G. & Dussan, E.B. "On the Nature of the Dynamic Contact Angle: an Experimental Study". J. Fluid Mech. 116, 27-40
- 1969 Ross, D.K. "The Stability of a Column of Liquid to Torsional Oscillations". ZAMP 20, 137-140
- 1982 Sanz, A. & Martinez, I. "Minimum Volume for a Liquid Bridge between Equal Discs". J. Colloid Interf. Sci. (submitted)

Exp. 331: FLOATING ZONE STABILITY IN ZERO GRAVITY. Da Riva

P R O C E D U R E S

0. PREPARATION
1. FORMING CYLINDRICAL ZONE
2. CYLINDRICAL STRETCHING
3. AXIAL OSCILLATION
4. SINGLE DISC ROTATION
5. COUNTERROTATION
6. ISOROTATION INSTABILITY AT POINT C
7. ISOROTATION INSTABILITY AT POINT D
8. ISOROTATION INSTABILITY AT POINT E
9. ISOROTATION INSTABILITY AT POINT F
10. LATERAL SHIFT IN ISOROTATION
11. CYLINDRICAL BREAKING
12. UNEQUAL MERGING
13. BREAKING BY SUCTION
14. LIQUID RECOVERY
15. TERMINATION

Exp. 331. Phase 0: P R E P A R A T I O N

Stp	A c t i o n	Value	Comment
	REM: FPM is assumed to be ready		
.1	Configure visualization system Camera unit Film magazine (2476) Speed (fps) Shutter(°) Diaphragm (f/) Optical filter Meridian shutter	B 6.1 8 110 4 Black Open	Exclusively. 1870 frames are scheduled. Verify good adjustment. Only meridian plane illuminat. Verify optical path.
.2	Configure electrical system Power on FPM at CCO STR FPM ENT DIN FPM 6 1 ENT RSM FPM ENT DIN FPM 1 ENT	On	Ops light flashing. Data available on ground. Exp. 331, Data Acq. Mode 1. Default is display mode 0. Verify OSCamp=0 (in 3R). Verify LATpos=0 (in 4R). Ops light & LEDs on. Display mode 1: FPpos & RESpos.
.3	Configure liquid supply system Pull out FPM Open test chamber Install rear plate Install front plate Close test chamber Install reservoir: For RUN 1..... For RUN 2..... Open test chamber Open reservoir valve Fill feeding pipe Close test chamber Push on FPM	RD38 FD38 DMS-5-T DMS-100	38.8mm standard disc: 8mm heel. 38.8mm standard disc .5mm heel. Verify disc lockers off. To ease reservoir mounting. SHAKE BEFORE!. Low viscosity oil with tracers. -T. High viscosity oil, tracers. Protect against jets. See small liquid cap & reset. Verify zeroing-rod position
.4	Initialization Set translation: FP position (mm) RES position (mm) FP speed (mm/s) RES speed (mm/s) Zero translation Set camera: camera mode exposure (s) interval (s) frames Start camera	000.0 000.0 .999 .999 B CINE .5 1 50	Zeroing counters. SPEEDS MUST BE EQUAL!. Protected switch (black). To remove leading tail. Only for overexposures. Constant throughout. Verify film-transport light.
	END: FPM ready to start experiment		

Exp. 331. Phase 1: FORMING CYLINDRICAL ZONE

Stp	Action	Value	Comment
	REM: Enter from Phase 0. Follow sequence 0-A-B in the diagram		Ddisc=38.8mm & Dresv=98.8mm. Cylindrical volume: RES=.846*FP.
.1	Separate discs without injection Set translation: FP position (mm) RES position (mm) FP speed (mm/s) RES speed (mm/s) Start translation	029.1 029.1 .999 .999	FPpos=.75*Disc for contact. No injection. Maximum speed. 29s. From 0 to A. No pictures.
.2	Inject at constant separation Set translation: FP position (mm) RES position (mm) FP speed (mm/s) RES speed (mm/s) Set camera: mode frames Start camera Start translation	029.1 024.6 .999 .150 CINE 270	Inject a cylindrical volume. No jet should be formed. Spread, grow, touch & spread. Small speed. 33s. Verify lighting system. 30s. From A to B. Contact when edge angle =112°. Verify force perfect attachmt.
	END: Small cylindric. zone formed. IF NOT: Liquid overflow at FP edge?		RECOVERY, clean and try again.

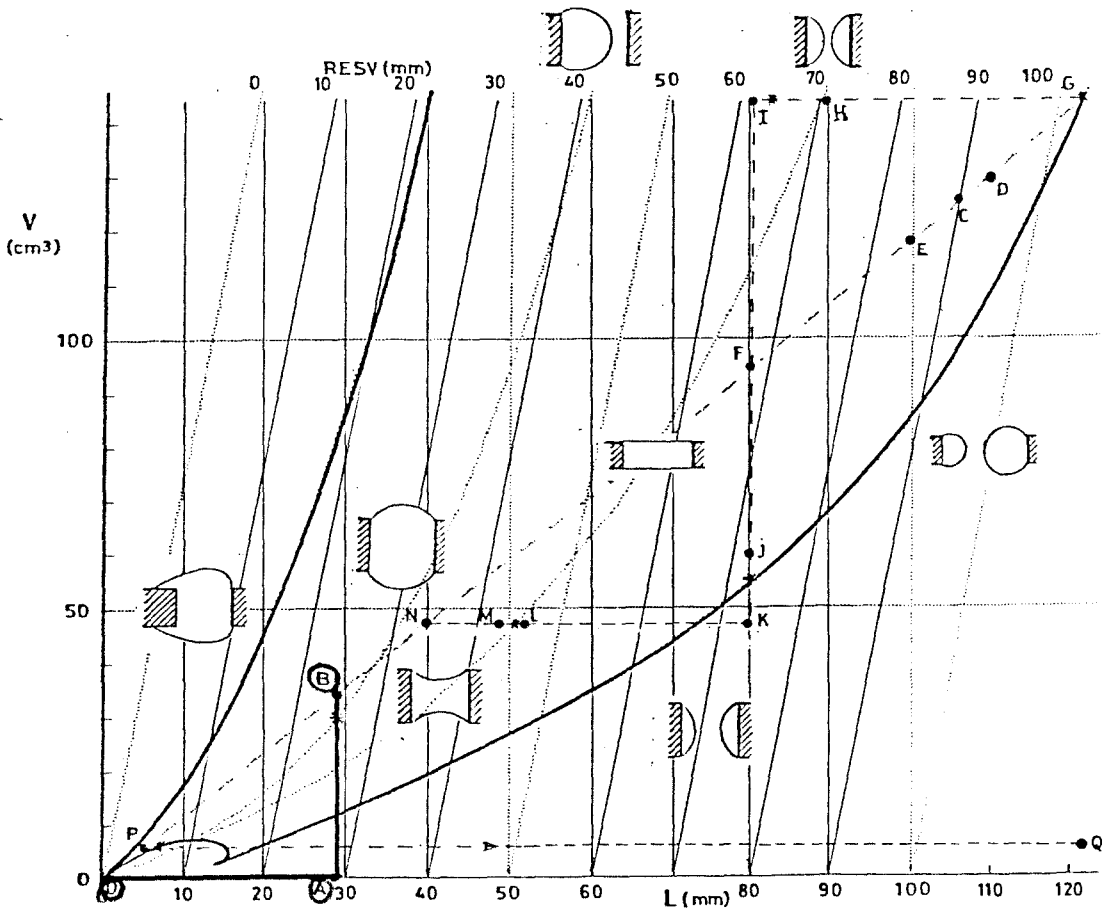


Fig. 1. Stability limits, breakage modes and sequence for Exp. 1-ES-331.

Exp. 331. Phase 2: CYLINDRICAL STRETCHING

Stp	A c t i o n	Value	Comment
	REM: Obtain a long liquid column		From B to C.
.1	Set translation: FP position (mm) RES position (mm) FP speed (mm/s) RES speed (mm/s) Set camera: mode frames Start camera Start translation	105.6 089.3 .999 .845 BRIEF 80	Cylindrical filling. 80s. 77s. Watch submerged jet. Watch small shape distortion. Check axisymmetric evolution.
	END: Long cylindrical zone IF NOT: Radial departures <2mm...? Radial departures >2mm...? Liquid bridge broken.....? Liquid bridge impossible?		Acceptable. Reduce FPpos & RESpos by 10%. Try again. Merge as from G to H suck as from H to F & repeat with FPs=.116 & RESs=.100. Try again as above, reducing FPpos & RESpos by 10%.

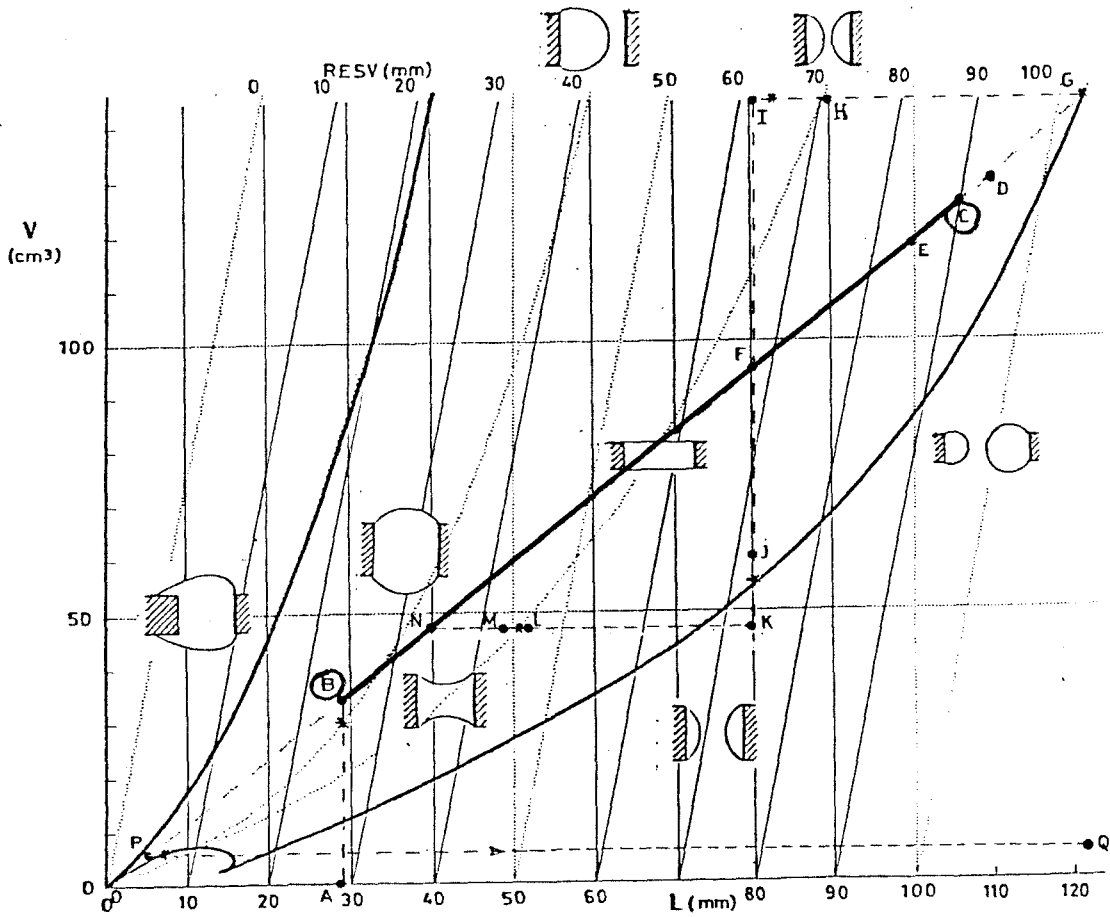


Fig. 1. Stability limits, breakage modes and sequence for Exp. 1-ES-331.

Exp. 331. Phase 3: A X I A L O S C I L L A T I O N

Step	Action	Value	Comment
	REM: Impose oscillations to a cylindrical zone		Look for standing waves. No breaking expected.
.1	Minimum frequency DIN FPM 0 ENT Set oscillation: frequency (Hz) ramp amplitude (mm) Set camera: mode frames Start camera oscillation	0.10 SLOW .5 BRIEF 030	One wave expected. LATpos & OSCamp. Maximum. 30s. See if there is any motion.
.2	Frequency sweeping up Set oscillation: frequency (Hz) amplitude (mm) Start: camera oscillation	2.00 .5	Traveling waves (Note standing) 30s.
.3	Frequency sweeping down Set oscillation: frequency (Hz) amplitude (mm) Start camera Start oscillation Reset oscillation amplitude (mm) DIN FPM 1 ENT	0.00 .5 .0	Traveling waves (Note standing) 30s. Allow for camera stop. DONT FORGET! FPpos & RESpos.
	END: Leaves zone the same IF NOT: Liquid bridge broken....?		Merge, stretch & go on.

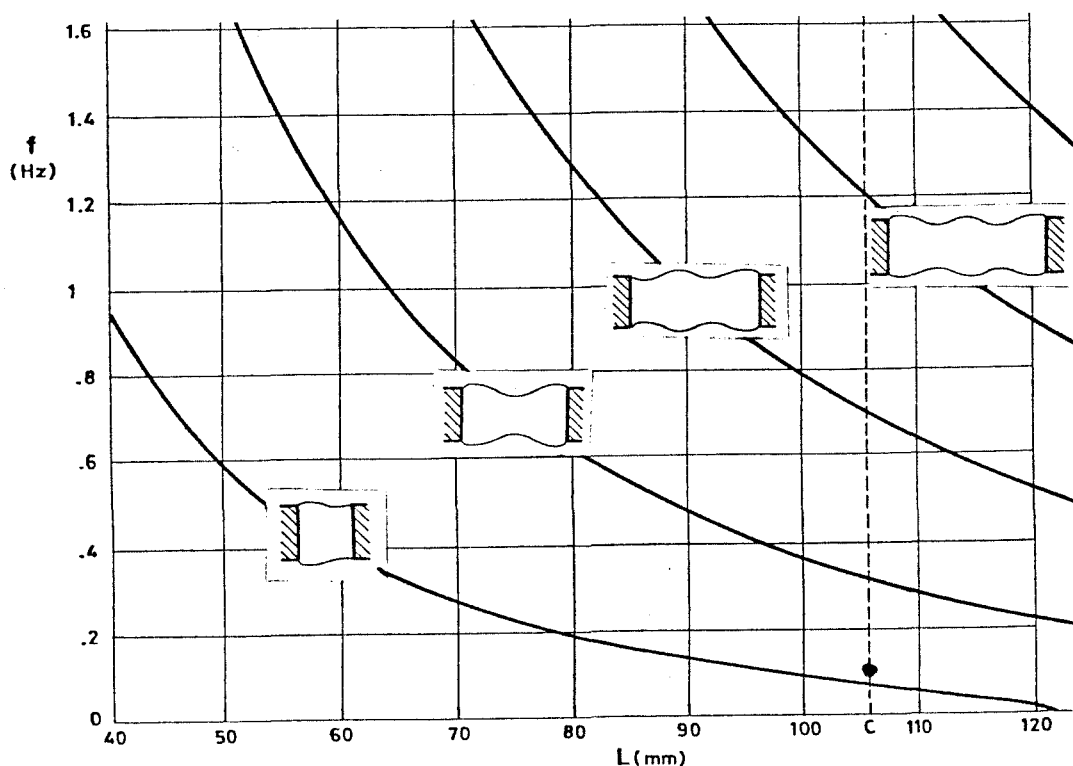
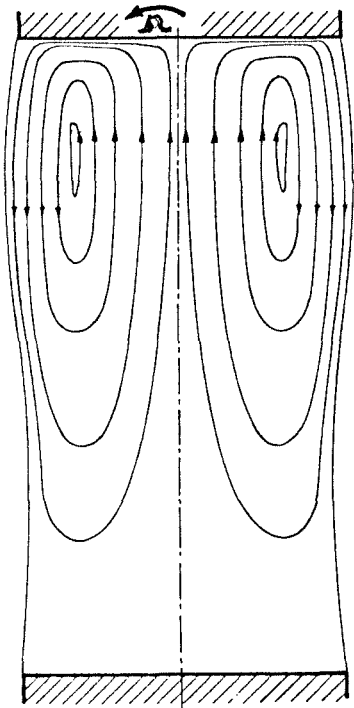


Fig. 2. Natural frequencies for a long cylindrical zone. Working point at C.

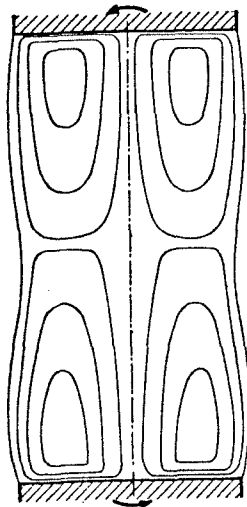
Exp. 331. Phase 4: SINGLE DISC ROTATION

Stp	A c t i o n	Value	Comment
	REM: Impose single disc rotation on a long cylindrical zone		Look for steady state. No breaking expected.
.1	Spin up Set rotation: FP speed (rpm) FP ramp (s/rpm) RP speed (rpm) RP ramp (s/rpm) Set camera: mode frames Start camera Start rotation When steady state reached.....?	+08.0 0 +00.0 0 BRIEF 030 FRONT	Sudden start. 30s. Monitor steady state. Take one more picture manually.
.2	Spin down Start camera Stop rotation		30s. Sudden stop.
	END: Leaves same cylindrical zone IF NOT: Liquid bridge broken.....?		Stop rotation, merge, stretch & try again with 5rpm.



Exp. 331. Phase 5: C O U N T E R R O T A T I O N

Step	A c t i o n	Value	Comment
	REM: Impose disc counterrotation on a long cylindrical zone		Look for steady state. No breaking expected.
.1	Spin up Set rotation: FP speed (rpm) FP ramp (s/rpm) RP speed (rpm) RP ramp (s/rpm) Set camera: mode frames Start camera Start rotation When steady state reached.....	+88.0 0 -88.0 0 BRIEF 030 BOTH	Sudden start. 30s. Monitor steady state. Take one more picture manually.
.2	Spin down Start camera Stop rotation	 BOTH	 60s. Sudden stop.
	END: Leaves same cylindrical zone IF NOT: Liquid bridge broken.....?		Stop rotation, merge, stretch & try again with 5rpm.



Exp. 331. Phase 6: ISOROTATION INSTABILITY AT POINT C

Stp	Action	Value	Comment
	REM: Get solid-body rotation, then surpasses the stability limit. Zone assumed at point C		This Phase has HIGHEST RISK!. No breaking desired. Be ready to stop rotation at once.
.1	Spin up Set rotation: FP speed (rpm) FP ramp (s/rpm) RP speed (rpm) RP ramp (s/rpm) Set camera: mode frames Start camera Start rotation IF liquid bridge breaks.....	 +08.0 0 +08.0 0 BRIEF 060 BOTH	 To get solid-body rotation near the stability limit. Sudden start. 60s. Monitor steady state. Get C/8. Merge & try again with 5rpm.
.2	Try instability at separat. point Set rotation: FP speed (rpm) FP ramp (s/rpm) RP speed (rpm) RP ramp (s/rpm) Start camera Start rotation IF rupture imminent, Stop rotation IF stable bridge, Redo with 15rpm IF liquid bridge breaks.....	 +10.0 9 +10.0 9 BOTH	 From C/8 to C/10. 60s. Change to CINE & restart camera Merge & try again (more care).
	END: Leaves zone at point C @ 0rpm		

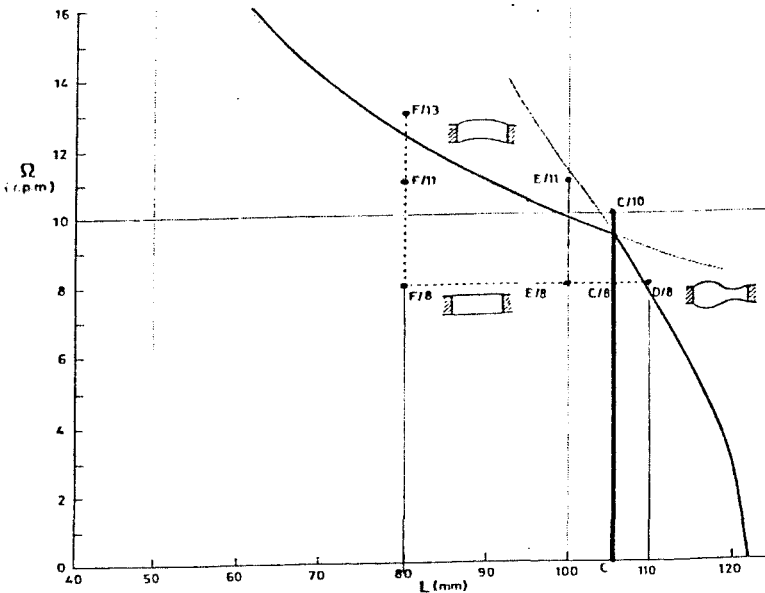
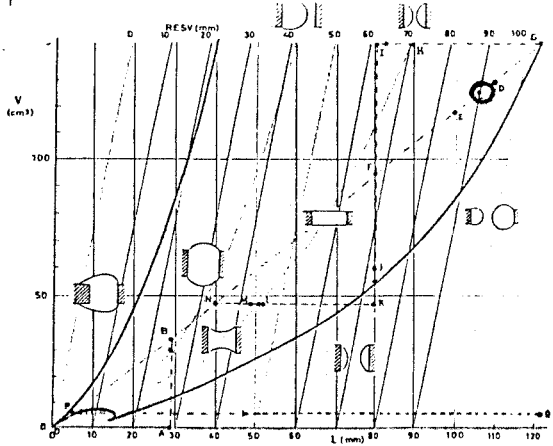
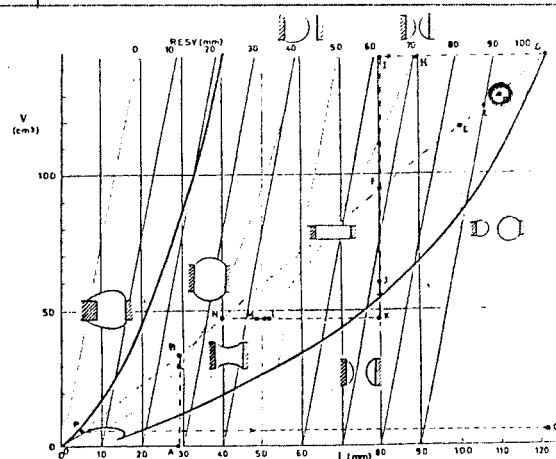
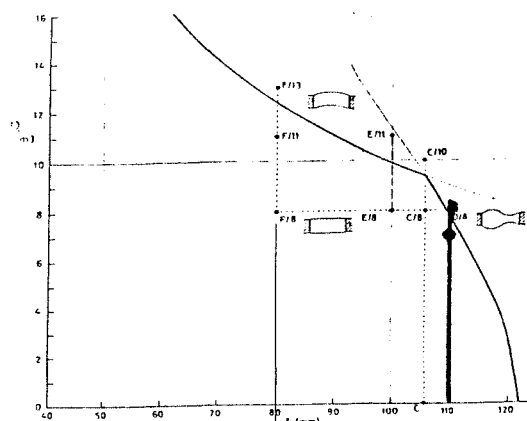


Fig. 3. Stability of a cylindrical liquid column in solid-body rotation. Nominal sequence for Exp. 1-ES-331. Disalignement at F/11.



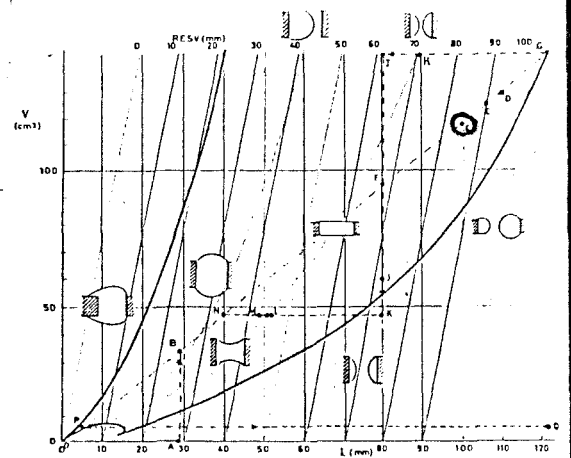
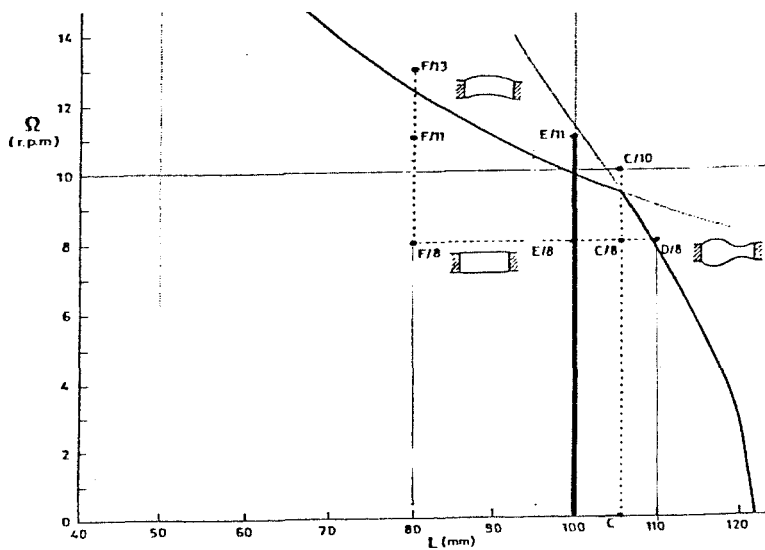
Exp. 331. Phase 7: ISOROTATION INSTABILITY AT POINT D

Step	Action	Value	Comment
	REM: Get solid-body rotation, then surpasses the stability limit. Zone assumed at point C		This Phase has HIGHEST RISK!. No breaking desired. Be ready to stop rotation at once.
.1	Increase slenderness Set translation: FP position (mm) RES position (mm) FP speed (mm/s) RES speed (mm/s) Set camera: mode frames Start camera Start translation	110.0 893.9 .999 .845 BRIEF 810	From C to D. 10s. Monitor jet pattern. 5s. If breaking, try again slow
.2	Spin up Set rotation: FP speed (rpm) FP ramp (s/rpm) RP speed (rpm) RP ramp (s/rpm) Set camera: mode frames Start camera Start rotation IF liquid bridge breaks.....	+07.0 0 +07.0 0 BRIEF 860 BOTH	To get solid-body rotation near the stability limit. Sudden start. 60s. Monitor steady state. Get D/7. Merge & try again with 5rpm.
.3	Try amphora instability Set rotation: FP speed (rpm) FP ramp (s/rpm) RP speed (rpm) RP ramp (s/rpm) Start camera Start rotation IF rupture imminent, Stop rotation IF stable bridge, Redo with 15rpm IF liquid bridge breaks.....	+08.0 9 +08.0 9 BOTH	From D/7 to D/8. 60s. Change to CINE & restart camera Merge & try again (more care).
	END: Leaves zone at point D & 0rpm		



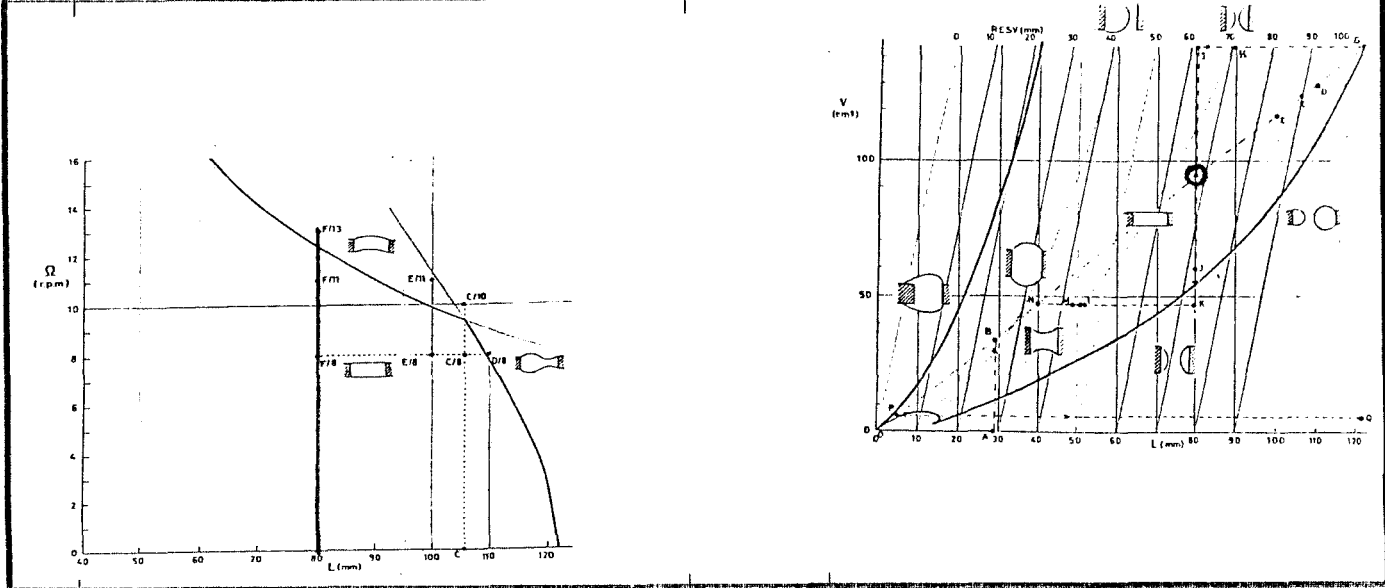
Exp. 331. Phase 8: ISOROTATION INSTABILITY AT POINT E

Stp	A c t i o n	Value	Comment
	REM: Get solid-body rotation, then surpass the stability limit. Zone assumed at point D		This Phase has HIGHEST RISK!. No breaking desired. Be ready to stop rotation at once.
.1	Decrease slenderness Set translation: FP position (mm) RES position (mm) FP speed (mm/s) RES speed (mm/s) Set camera: mode frames Start camera Start translation	100.0 084.6 .999 .845 BRIEF 010	From D to E. 10s. Monitor sink pattern. 10s.
.2	Spin up Set rotation: FP speed (rpm) FP ramp (s/rpm) RP speed (rpm) RP ramp (s/rpm) Set camera: mode frames Start camera Start rotation IF liquid bridge breaks.....	+09.0 0 +09.0 0 BRIEF 060 BOTH	To get solid-body rotation near the stability limit. Sudden start. 60s. Monitor steady state. Get E/9. Merge & try again with 5rpm.
.3	Try C-mode instability Set rotation: FP speed (rpm) FP ramp (s/rpm) RP speed (rpm) RP ramp (s/rpm) Start camera Start rotation IF rupture imminent, Stop rotation IF stable bridge, Redo with 15rpm IF liquid bridge breaks.....	+10.0 0 +10.0 0 BOTH	From E/9 to E/10. This time sudden jump. 60s. Change to CINE & restart camera Merge & try again (more care).
	END: Leaves zone at point E & 0rpm		



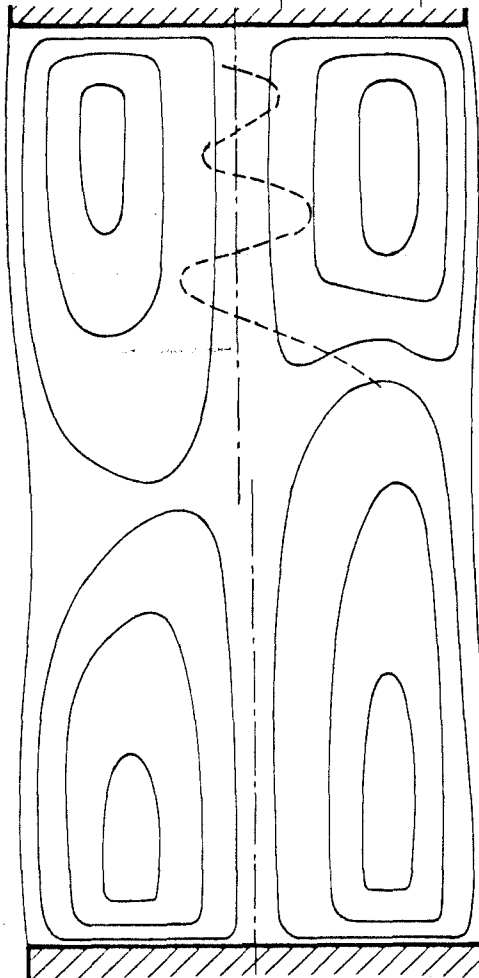
Exp. 331. Phase 9: ISOROTATION INSTABILITY AT POINT F

Step	Action	Value	Comment
	REM: Get solid-body rotation, then surpass the stability limit. Zone assumed at point E		This Phase has HIGHEST RISK!. No breaking desired. Be ready to stop rotation at once.
.1	Decrease slenderness Set translation: FP position (mm) RES position (mm) FP speed (mm/s) RES speed (mm/s) Set camera: mode frames Start camera Start translation	080.0 067.7 .999 .845 BRIEF 020	From E to F. 20s. Monitor sink pattern. 20s.
.2	Spin up Set rotation: FP speed (rpm) FP ramp (s/rpm) RP speed (rpm) RP ramp (s/rpm) Set camera: mode frames Start camera Start rotation IF liquid bridge breaks.....	+11.0 0 +11.0 0 BRIEF 060 BOTH	To get solid-body rotation near the stability limit. Sudden start. 60s. Monitor steady state. Get F/11. Merge & try again with 5rpm.
.3	Try C-mode instability Set rotation: FP speed (rpm) FP ramp (s/rpm) RP speed (rpm) RP ramp (s/rpm) Start camera Start rotation IF rupture imminent, Stop rotation IF stable bridge, Redo with 20rpm IF liquid bridge breaks.....	+13.0 9 +13.0 9 BOTH	From F/11 to F/13. 60s. Change to CINE & restart camera Merge & try again (more care).
	END: Leaves zone at point F & 0rpm		



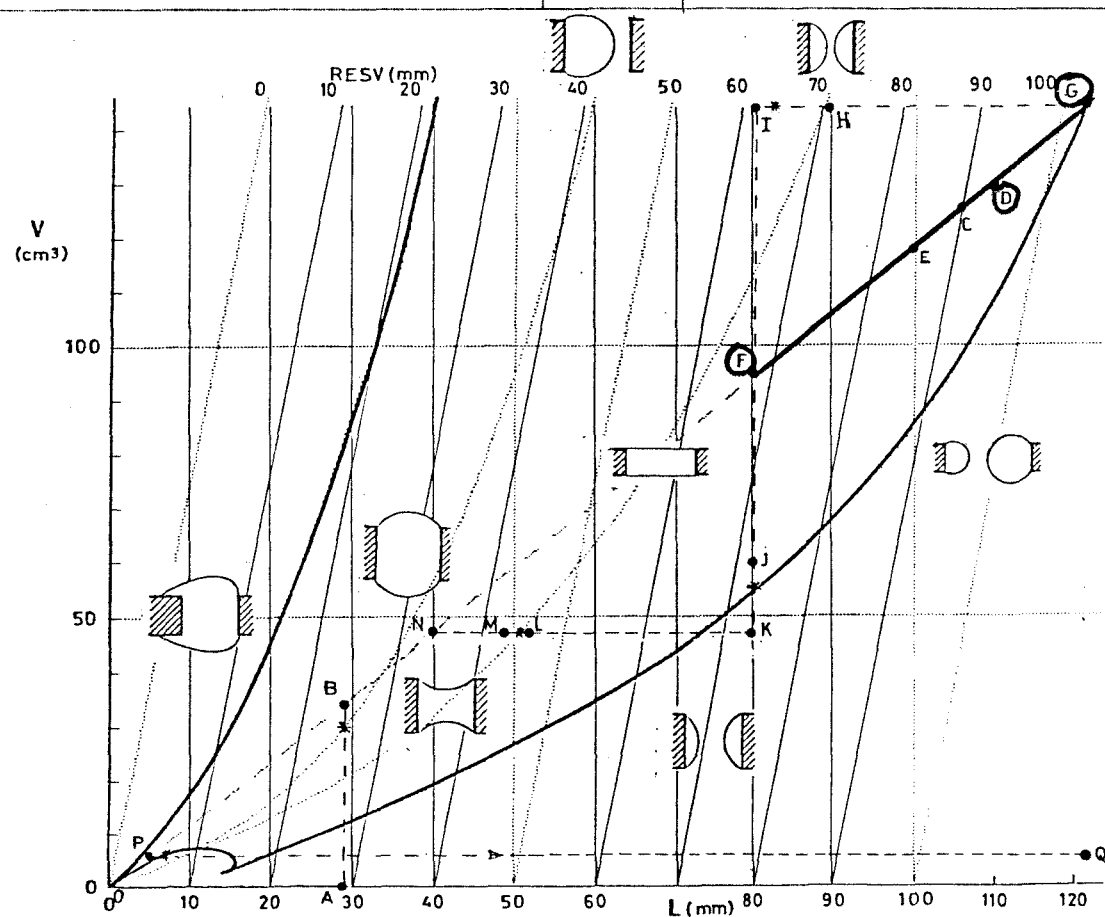
Exp. 331. Phase 10: LATERAL SHIFT IN ISOROTATION

Step	Action	Value	Comment
	REM: First shift disc, then rotate Zone assumed at point F. Look for C- or S-mode deformation		No breaking desired. Be ready to stop rotation at once.
.1	Lateral shift DIN FPM 0 ENT Actuate lateral displacement(mm)	2	No risk. OSCamp & LATpos. Maximum.
.2	Spin up with lateral shift Set rotation: FP speed (rpm) FP ramp (s/rpm) RP speed (rpm) RP ramp (s/rpm) Set camera: mode frames Start camera Start rotation IF rupture imminent, Stop rotation IF stable bridge, Redo with 20rpm IF liquid bridge breaks..... Actuate lateral displacement(mm) DIN FPM 1 ENT	+13.0 9 +13.0 9 BRIEF 120 BOTH 0 1	120s. Change to CINE & restart camera Merge, try again with more care FPpos & RESpos
	END: Leaves zone at point F & 0rpm		



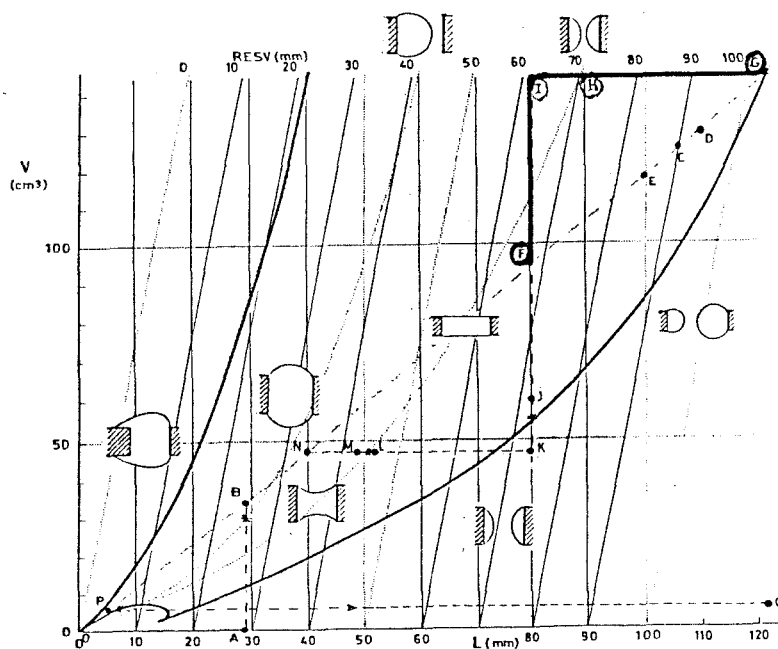
Exp. 331. Phase 11: C Y L I N D R I C A L B R E A K I N G

Step	Action	Value	Comment
	REM: Cylindrical filling. No rot. Zone assumed at point F.		Controlled breaking desired.
.1	Quick stretching Set translation: FP position (mm) RES position (mm) FP speed (mm/s) RES speed (mm/s) Set camera: mode frames Start camera Start translation IF rupture imminent, Stop transl.	110.0 093.9 .999 .845 BRIEF 040	From F to D. To save time. 40s. 30s. Monitor jet pattern. Change to CINE & restart camera
.2	Slow stretching Set translation: FP position (mm) RES position (mm) FP speed (mm/s) RES speed (mm/s) Set camera: mode frames Start camera Start translation	122.0 103.2 .118 .100 BRIEF 150	From D to G. Maximum. Minimum. Be ready to change to CINE. Change to CINE at breaking. 100s. Monitor jet disturbance. Assured good CINE recording!.
	END: Leaves broken zone (point G) IF liquid overflows disc edge.....		Verify good edge condition. RECOVERY, clean & try again.



Exp. 331. Phase 12: UNEQUAL MERGING

Step	Action	Value	Comment
	REM: General procedure to join the bridge to go on or to recover		Merging is a violent event. Avoid overflowing.
.1	Quick approaching Set translation: FP position (mm) RES position (mm) FP speed (mm/s) RES speed (mm/s) Set camera: mode frames Start camera Start translation	090.0 081.2 .999 .999 BRIEF 030	From G to H. To save time. 30s. Monitor oscillations.
.2	Slow touching Set translation: FP position (mm) RES position (mm) FP speed (mm/s) RES speed (mm/s) Set camera: mode frames Start camera Start translation	080.0 061.2 .200 .200 BRIEF 100	From H to I. Be ready to change to CINE. Change to CINE at touching 50s. Monitor contact.
.3	Suction to get a cylindrical shape Set translation: FP position (mm) RES position (mm) FP speed (mm/s) RES speed (mm/s) Set camera: mode frames Start camera Start translation	080.0 067.7 .999 .999 BRIEF 010	From I to F. No relevant. Maximum. 10s. 7s. Monitor sink pattern.
	END: Leaves cylindrical zone at F		Verify good cylindricity.



Exp. 331. Phase 13: B R E A K I N G B Y S U C T I O N

Stp	A c t i o n	Value	Comment
	REM: Start from a cylindrical zone and remove liquid till breaking. Recover cylindr. shape		Globally, from F to N. Figures assume start at F
.1	Quick approach (from F to J) Set translation: FP position (mm) RES position (mm) FP speed (mm/s) RES speed (mm/s) Set camera: mode frames Start camera Start translation	080.0 071.8 .999 .500 BRIEF 010	
.2	Breaking by slow suction Set translation: FP position (mm) RES position (mm) FP speed (mm/s) RES speed (mm/s) Set camera: mode frames Start camera Start translation	080.0 073.8 .999 .100 BRIEF 060	From J to K. No relevant. Minimum. Be ready to change to CINE. Change to CINE at breaking. 20s. Monitor disruption.
.3	Approaching contact at constant V Set translation: FP position (mm) RES position (mm) FP speed (mm/s) RES speed (mm/s) Set camera: mode frames Start camera Start translation	052.0 045.8 .999 .999 BRIEF 030	From K to L. Maximum. No liquid removal. 30s. 28s.
.4	Contact Set translation: FP position (mm) RES position (mm) FP speed (mm/s) RES speed (mm/s) Set camera: mode frames Start camera Start translation	049.0 042.8 .100 .100 BRIEF 060	From L to M. Monitor contact. Minimum. No liquid removal. Be ready to change to CINE. Change to CINE at contact. 30s.
.5	Get a cylindrical zone at V=const Set translation: FP position (mm) RES position (mm) FP speed (mm/s) RES speed (mm/s) Set camera: mode frames Start camera Start translation	040.0 033.8 .999 .999 BRIEF 010	From M to N. Maximum. No liquid removal. 10s. 9s.
	END: Leaves cylindrical zone at N		Verify good cylindricity.

Exp. 331. Phase 15: T E R M I N A T I O N

Step	Action	Value	Comment
	REM: Leave FPM ready		
.1	Reset visualization system Set camera: mode frames Start camera Remove, label & store film	CINE 850	Remove trailing film. 7s.
.2	Reset electrical system DIN FPM 9 ENT Power off FPM at CDD		Data acquisition off. Verify LEDs off.
.3	Reset liquid supply system Pull out FPM Open test chamber Close reservoir valve Close test chamber Remove reservoir & store Open test chamber Clean reservoir valve Clean feeding duct Clean test chamber Remove rear plate Remove front plate Close test chamber Push in FPM & close front panel		Protect against jets. To better manipulate reservoir. RD38 FD38
	END: FPM should be left ready		

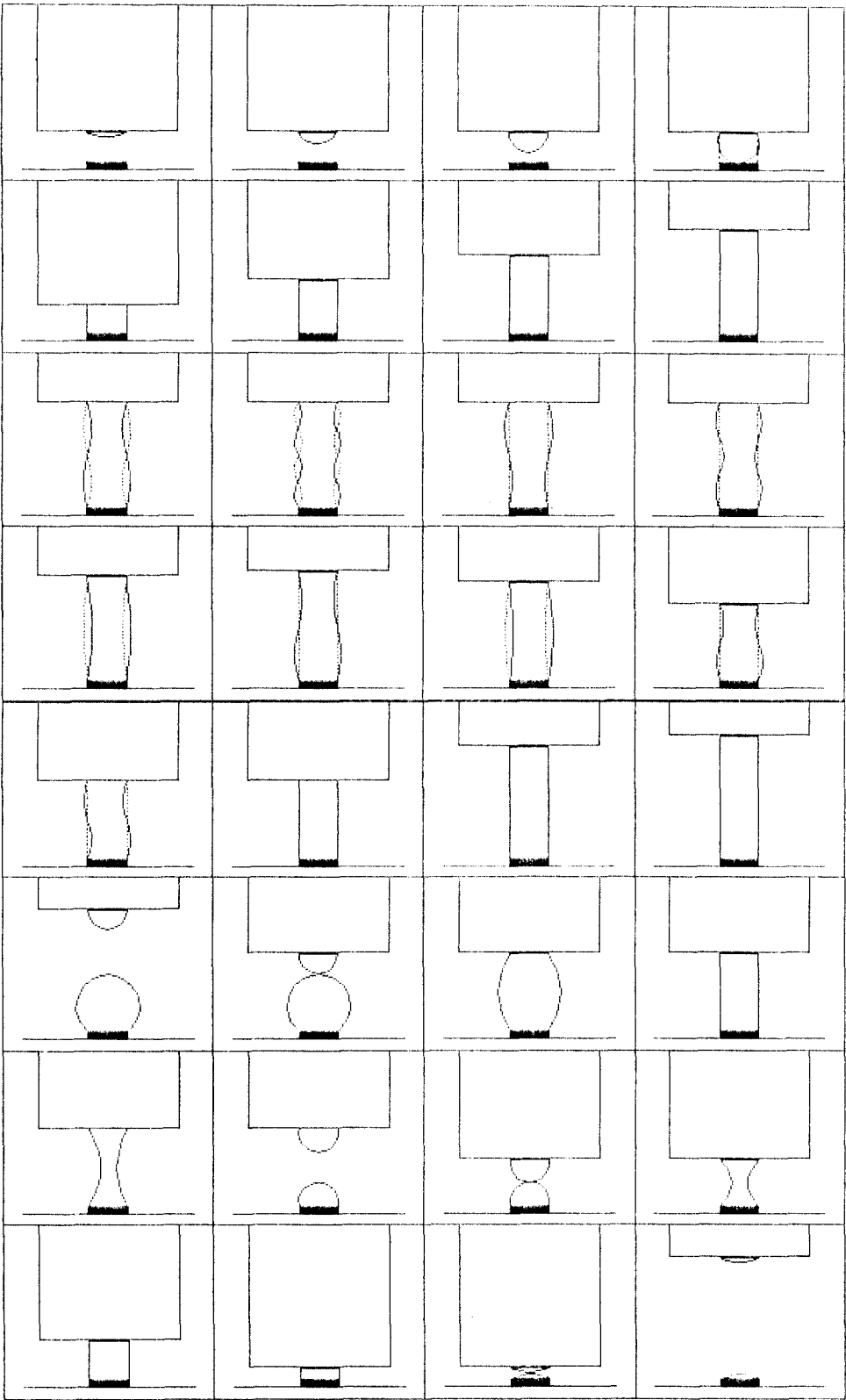


Fig. 4. Cartoon of Exp. 331 as seen by the FPM view-aid.